

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕАКЦИИ ОБРАЗОВАНИЯ КСНОТЛИТА ИЗ ИЗВЕСТКОВО-КРЕМНЕЗЕМИСТОГО ВЯЖУЩЕГО ПРИ АВТОКЛАВНОМ ТВЕРДЕНИИ

М.В. Кафтаева, Ш.М. Рахимбаев, Н.Д. Комарова, В.Л. Курбатов

Изложены результаты термодинамического анализа реакции образования гидросиликата кальция – ксонотлита – из смеси гидроксида кальция и диоксида кремния при температурах 25 и 190 °С. Рассчитаны активности ионов кальция, кремнекислоты и гидроксила, для чего использован термодинамический цикл Борна-Габер с учетом предельной формулы Дебая – Хюккеля. Верификация результатов расчетов произведена на основе литературных данных. Установлено, что лимитирующей стадией синтеза ксонотлита является образование в растворе ионов кальция и сопутствующих ионов, поэтому важнейшим способом его ускорения является применение минеральных добавок и электролитов, повышающих их активность в жидкой фазе.

Ключевые слова: химическая термодинамика, газосиликатные стройматериалы, автоклавная обработка, активность ионов, синтез ксонотлита.

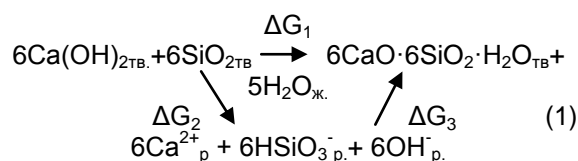
Ксонотлит C_6S_6H является важнейшим компонентом гидросиликатной связки материалов автоклавного твердения на основе известково-кремнеземистых вяжущих, так как он обеспечивает повышенную атмосферостойкость по сравнению с тоберморитом, окенитом и другими низкоосновными гидросиликатами кальция.

В источнике [1] приведены результаты экспериментальных исследований ксонотлита, а в [2–4] произведен термодинамический анализ синтеза ксонотлита из смесей различного состава при температурах 25 и 175 °С. Несмотря на достаточный интерес отечественных и зарубежных исследователей к этому вопросу [1, 5–8], многие вопросы синтеза ксонотлита изучены недостаточно. Это, в частности, обусловлено тем, что ксонотлит при понижении температуры среды имеет свойство превращаться в тоберморит. При повторном нагреве его до 170–200 °С возможен обратный переход тоберморита в ксонотлит [2, 8]. Это затрудняет фазовый анализ системы $CaO-SiO_2-H_2O$ при 170–200 °С при использовании экспериментальных методов исследований.

В данной работе предлагается термодинамический анализ синтеза ксонотлита с использованием цикла Борна-Габер, который позволяет рассчитывать термодинамический эффект не только для конечного результата синтеза того или иного соединения, но и для любых его промежуточных стадий, включая влияние на ΔG^0_T процесса энергии атомизации Ca и Si, их потенциалов ионизации, свободных энергий гидратации ионов и т.п. [2–4, 9, 10].

Рассмотрим синтез ксонотлита при 25 °С

(298 К) с образованием в качестве промежуточных продуктов $HSiO_3^-$ (метасиликат-ион) и $H_2SiO_4^{2-}$ (ортосиликат-ион). Первый образуется из второго путем его частичной полимеризации (олигомеризации).



Здесь:

ΔG_1 – суммарное изменение изобарно-изотермического потенциала системы при синтезе ксонотлита с выделением 5 моль воды на один моль C_6S_6H ;

ΔG_2 – то же в результате образования ионов Ca^{2+} , $HSiO_3^-$ и OH^- из твердых гидроксида кальция и кварца;

ΔG_3 – свободная энергия образования твердых частиц ксонотлита из упомянутых ионов, находящихся в жидкой фазе (поровом растворе). Так как цикл замкнутый, то при указанном в (1) направлении стрелок:

$$\Delta G_1 = \Delta G_2 + \Delta G_3, \text{ а } \Delta G_3 = \Delta G_1 - \Delta G_2.$$

Проверка на соблюдение этих соотношений является одним из способов верификации выполненных расчетов.

Исходные данные были взяты из [3, 4].

Для $t = 25$ °С (298 К) получаем:

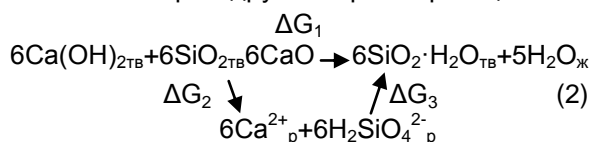
$$\Delta G_1 = 6 \cdot 214,4 + 6 \cdot 204,75 - 2259,4 - 5 \cdot 56,7 = -28,0 \text{ ккал};$$

$$\Delta G_2 = -6 \cdot 132,2 - 6 \cdot 243,3 - 6 \cdot 37,6 + 6 \cdot 214,4 + 6 \cdot 204,75 = 35,1 \text{ ккал};$$

$$\Delta G_3 = 2259,4 + 5 \cdot 56,7 - 6 \cdot 132,2 - 6 \cdot 243,3 - 6 \cdot 37,6 = -63,1 \text{ ккал}.$$

Расчет показал, что синтез ксонотлита из смеси гидроксида кальция и кварца уже при комнатной температуре сопровождается уменьшением изобарно-изотермического потенциала системы и процесс должен идти самопроизвольно до конца. [11, 12]. На практике эта реакция возможна, очевидно, в тонком, возможно мономолекулярном слое, а в объеме процесс невозможен из-за диффузионных ограничений.

Рассмотрим другой вариант реакции.



В данном случае вместо метасиликат-иона HSiO_3^- предполагается образование ортосиликат-иона.

$$\Delta G_1 = -28,0 \text{ ккал/моль};$$

$$\Delta G_2 = 6 \cdot 204,75 + 6 \cdot 214,4 - 6 \cdot 132,2 - 6 \cdot 283,7 = 19,5 \text{ ккал};$$

$$\Delta G_3 = 6 \cdot 132,2 + 6 \cdot 283,7 - 2259,4 - 5 \cdot 56,7 = -47,5 \text{ ккал}.$$

Рассчитаем активности ионов, находящихся в равновесии с ксонотлитом по схеме реакции (1) при 298 К.

$$\Delta G_3 = -63,1 \text{ ккал};$$

$$\lg K_{\text{р3}} = -\Delta G_3/RT = -46,26; \lg[\text{Ca}^{2+}_{\text{р}}] = -2,57;$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 2,69 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л} = 0,15 \text{ г/л CaO}.$$

$$[\text{HSiO}_3^-_{\text{р}}] = 2,69 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л} = 0,16 \text{ г/л SiO}_2;$$

$$\text{pH} = 11,4.$$

По схеме (2):

$$\Delta G_3 = -47,5 \text{ ккал};$$

$$\lg K_{\text{р3}} = -\Delta G_3/RT = -46,26; \lg[\text{Ca}^{2+}_{\text{р}}] = -2,90;$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 1,259 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л} = 0,07 \text{ г/л CaO}.$$

$$[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}_{\text{р}}] = 1,259 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л} = 0,075 \text{ г/л SiO}_2;$$

Полученный результат для активности ионов кальция (1,259 м-ион/л по CaO) хорошо согласуется с экспериментальными данными К.Г. Красильникова [9], если учесть, что при столь низком содержании ионов в жидкой фазе их коэффициенты активности мало отличаются от единицы.

Таким образом, при 25 °С схема растворения ксонотлита (2) более вероятна, чем (1).

Схема и обоснование расчетов при 190 °С даны в [2, 3].

Принимаем следующие исходные данные, ккал/моль:

Ксонотлит:

$$\Delta H^0_{298} = -2396,7; \Delta G^0_{298} = -2259,4.$$

$$C_p = 132,25 + 65,2 \cdot 10^{-3}T - 18,35 \cdot 10^5 T^{-2}.$$

Гидроксид кальция:

$$\Delta H^0_{298} = -235,33; \Delta G^0_{298} = -214,4.$$

$$C_p = 19,07 + 10,08 \cdot 10^{-3}T.$$

β – кварц:

$$\Delta H^0_{298} = -217,35; \Delta G^0_{298} = -204,75.$$

$$C_p = 11,22 + 8,2 \cdot 10^{-3}T - 2,7 \cdot 10^5 T^{-2}.$$

H_2O :

$$\Delta H^0_{298} = -68,3; \Delta G^0_{298} = -56,7.$$

$$C_p = 12,651 + 11,38 \cdot 10^{-3}T + 1,73 \cdot 10^5 T^{-2}.$$

Рассчитаем изменение изобарно-изотермического потенциала системы при 190 °С при образовании ортосиликат-иона:

$$\Delta G^0_{298} = -28,0 \text{ ккал/моль};$$

$$\Delta H^0_{298} = -2396,7 - 5 \cdot 68,3 + 6 \cdot 235,334 + 6 \cdot 217,35 = -19,72 \text{ ккал/моль};$$

$$\Delta a = 132,25 - 6 \cdot 19,07 - 6 \cdot 11,22 + 5 \cdot 12,65 = 13,76;$$

$$\Delta b = (65,2 - 6 \cdot 10,8 - 6 \cdot 8,2 + 5 \cdot 11,38) \cdot 10^{-3} = 8,1 \cdot 10^{-3};$$

$$\Delta c = (-18,35 + 5 \cdot 1,73 + 6 \cdot 2,7) \cdot 10^5 = 6,5 \cdot 10^5.$$

$$\Delta H_0 = \Delta H^0_{298} - a \cdot T + b \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} T^2 + c \cdot 10^5 T^{-1} = -19720,0 - 13,76 \cdot 298 - 0,5 \cdot 8,1 \cdot 10^{-3} \cdot 298^2 + 6,5 \cdot 10^5 = -21998,9 \text{ ккал/моль};$$

$$\Delta G^0_{298} = 21998,9 = \Delta H_0 - \Delta a \cdot 298 - \Delta b \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 298^2 + \Delta c \cdot 10^5 \cdot 298^{-1} + 298 \cdot x = -21998,9 - 13,76 \cdot 298 - 5,697 - 4,05 \cdot 10^{-3} \cdot 298^2 - 0,5 \cdot 6,5 \cdot 10^5 \cdot 298^{-1} + 298 \cdot x = -46809,6 + 298 \cdot x;$$

$$x = 63,1.$$

$$\Delta G^0_{463} = -21938,9 - 13,76 \cdot 463 \cdot 6,14 - 0,5 \cdot 8,1 \cdot 10^{-3} \cdot 463^2 - 0,5 \cdot 6,5 \cdot 10^5 \cdot 463^{-1} + 463 \cdot x = -33,4 \text{ ккал/моль}.$$

При температуре 150 °С, когда реакция взаимодействия $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с SiO_2 резко ускоряется:

$$\Delta G^0_{\text{р}} = 21938,9 - 13,76 \cdot 423 \cdot 6,04 - 0,5 \cdot 8,1 \cdot 10^{-3} \cdot 423^2 - 0,5 \cdot 6,5 \cdot 10^5 \cdot 423^{-1} + 63,1 \cdot 423 = -31,9 \text{ ккал/моль}.$$

Сравнение этой величины с ΔG^0_{298} показывает, что они отличаются друг от друга всего на 10–11 %, что не может объяснить резкий скачок скорости взаимодействия $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с SiO_2 при повышении температуры с 25 до 150 °С.

Термодинамический эффект реакции образования ксонотлита из смеси гидроксида кальция и SiO_2 при повышенных температурах можно рассчитать и другим способом. Для этого необходимо выяснить, каковы численные значения ΔG^0_T при определенных температурах, например, 190 °С (463 К).

Ниже излагается такой расчет.

При расчете ΔG^0_T гидроксида кальция используем исходные данные, приведенные выше.

$$\Delta H_0 = -235330 - 19,07 \cdot 298 - 0,5 \cdot 10,8 \cdot 298^2 \cdot 10^{-3} = -241492,4 \text{ ккал/моль};$$

$$\Delta G^0_{298} = -214400 = \Delta H_0 - a \cdot 298 \cdot \ln 298 - b \cdot 0,5 \cdot 298^2 \cdot 10^{-3} + 298 \cdot x = -241492,4 - 32375,25 - 479,5 + 298 \cdot x;$$

$$x = 200,8.$$

$$\Delta G^0_{463} = -241492,4 - 19,07 \cdot 463 \cdot 6,14 - 5,4 \cdot 463^2 \cdot 10^{-3} + 200,8 \cdot 463 = 203,7 \text{ ккал/моль}.$$

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕАКЦИИ ОБРАЗОВАНИЯ КСОНОТЛИТА
ИЗ ИЗВЕСТКОВО-КРЕМНЕЗЕМИСТОГО ВЯЖУЩЕГО ПРИ АВТОКЛАВНОМ ТВЕРЖДЕНИИ

Рассчитаем ΔG_{463}^0 β -кварца:
 $\Delta H_0 = -217750 - 3343,6 - 3640 - 906,0 = -225639,6$ ккал;

$\Delta G_{298}^0 = -204750 = 225639,6 - 3343,6 - 364 + 453 + 298 \cdot x$;

$\Delta G_{298}^0 = -228894,2 + 298 \cdot x$;

$x = 81,02$.

$\Delta G_{463}^0 = \Delta H_0 - a \cdot T \cdot \ln T - b \cdot 0,5 \cdot T^2 \cdot 10^{-3} - 0,5 \cdot c \cdot 10^5 \cdot T^{-1} + 463 \cdot x = -222363,6 - 31896,4 - 878,9 + 291,6 + 56824,0 = -198,6$ ккал/моль.

Расчет ΔG_{463}^0 для H_2O :

$\Delta G_{298}^0 = -56,7$ ккал/моль;

$\Delta H_{298}^0 = -68,3$ ккал/моль;

$C_p = 12,65 + 11,38 \cdot 10^{-3} \cdot T - 1,7 \cdot 10^5 \cdot T^{-2}$.

$\Delta H_0 = \Delta H_{298}^0 - a \cdot 298 + b \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 298^2 + c \cdot 10^5 \cdot 298^{-1} = -68300,0 - 12,65 \cdot 298 - 0,5 \cdot 11,38 \cdot 10^{-3} \cdot 298^2 + 1,7 \cdot 10^5 \cdot 298^{-1} = -72004,5$ ккал/моль;

$\Delta G_{298}^0 = -56700 = \Delta H_0 - 12,65 \cdot 298 \cdot \ln 298 - 11,38 \cdot 0,5 \cdot 298^2 \cdot 10^{-3} - 0,85 \cdot 10^5 \cdot 298^{-1} + 298 \cdot x$;

$x = 126,08$.

$\Delta G_{463}^0 = -241492,4 - 19,07 \cdot 463 \cdot 6,14 - 5,4 \cdot 463^2 \cdot 10^{-3} + 200,8 \cdot 463 = 203,7$ ккал/моль.

$\Delta G_{463}^0 = -72004,6 - 12,65 \cdot 463 \cdot 6,14 - 0,5 \cdot 11,38 \cdot 10^{-3} \cdot 463^2 - 0,85 \cdot 6,5 \cdot 10^5 \cdot 463^{-1} + 463 \cdot 126,08 = -51,0$ ккал/моль.

Расчет ΔG_{463}^0 для ксонотлита.

Исходные данные:

$\Delta G_{298}^0 = -2259,4$ ккал/моль;

$\Delta H_{298}^0 = -2396,7$ ккал/моль;

$C_p = 132,25 + 65,2 \cdot 10^{-3} \cdot T - 18,5 \cdot 10^5 \cdot T^{-2}$.

$\Delta H_0 = \Delta H_{298}^0 - a \cdot 298 + b \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 298^2 = -2396700 - 132,25 \cdot 298 - 0,5 \cdot 65,2 \cdot 10^{-3} \cdot 298^2 - 18,35 \cdot 10^5 \cdot 298^{-1} = -24451635$ ккал;

$\Delta G_{298}^0 = -2259400 = \Delta H_0 - 132,25 \cdot 298 \cdot 5,697 - 0,5 \cdot 65,2 \cdot 10^{-3} \cdot 298^2 + 0,5 \cdot 10^5 \cdot 298^{-1} + 298 \cdot x$;

$x = 1376,18$.

$\Delta G_{463}^0 = -24456163 - 132,25 \cdot 463 \cdot 6,14 - 0,5 \cdot 65,2 \cdot 463^2 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 18,35 \cdot 10^5 \cdot 463^{-1} + 1376,18 \cdot 463 = -2189,0$ ккал/моль.

Теперь можно рассчитать изменение изобарно-изотермического потенциала при синтезе ксонотлита при 190 °С.

$\Delta G_p^0 = -2189,0 - 5 \cdot 51,0 + 6 \cdot 198,6 + 6 \cdot 204,3 = -26,6$ ккал/моль.

Достоинство второй методики расчета состоит в том, что с ее помощью можно определить не только термодинамический эффект образования ксонотлита из исходных материалов, но и, используя схемы (1) и (2), рассчитать ΔG_2 и ΔG_3 . На этой основе выяснить, каковы активности ионов в жидкой фазе при высоких температурах, характерных для автоклавных технологий производства известково-песчаных изделий.

Рассмотрим термодинамику реакции, протекающей по схеме (1) при 463 К.

$\Delta G_{2(463)}^0 = 6 \cdot \Delta G_{CH_2}^0 + 6 \cdot \Delta G_{SiO_2}^0 - 6 \cdot \Delta G_{Ca^{2+}}^0 - 6 \cdot \Delta G_{HSiO_3^-}^0 - 6 \cdot \Delta G_{OH^-}^0 = 6 \cdot 203,7 + 6 \cdot 198,3 -$

$6 \cdot 132,7 - 6 \cdot 225,0 - 625,5 = 112,8$ ккал;

$\Delta G_{3(463)}^0 = 6 \cdot 132,7 + 6 \cdot 225,0 + 6 \cdot 25,5 - 2189,0 - 5 \cdot 51,0 = 114,8$ ккал.

Рассчитаем активности ионов, находящихся в равновесии с $Ca(OH)_2 + SiO_2$.

$\Delta G_2 = 112,8$ ккал;

$\lg K_{p2} = -\Delta G_2/RT = -53,2$;

$K_{p2} = [Ca^{2+}]^6 \cdot [HSiO_3^-]^6 \cdot [OH^-]^6 = [Ca^{2+}]^{18}$;

$\lg [Ca^{2+}] = -2,95$;

$[Ca^{2+}] = 1,12 \cdot 10^{-3}$ моль/л = 0,063 г/л CaO.

$[HSiO_3^-] = [Ca^{2+}] = 1,122 \cdot 10^{-3}$ моль/л = 0,67 г/л SiO_2 .

$[OH^-] = [Ca^{2+}] = 1,22 \cdot 10^{-3}$ моль/л; pH = 11,05.

Активность *a* ионов кальция Ca^{2+} в пересчете на CaO хорошо согласуется с растворимостью *c* $Ca(OH)_2$ при 190 °С (0,084 г/л), т.к. $a = c \cdot f$, где $f < 1$.

Рассмотрим активность ионов, находящихся в равновесии с ксонотлитом.

$\Delta G_3 = -144,8$ ккал;

$\lg K_{p3} = -\Delta G_3/RT = -68,3$; $\lg [Ca^{2+}] = -3,79$;

$[Ca^{2+}] = 1,62 \cdot 10^{-4}$ моль/л = 9 мг/л CaO.

$[HSiO_3^-] = 0,01$ г/л SiO_2 ;

pH = 10,2.

Этот результат по CaO удовлетворительно согласуется с данными Флинта, Мак-Мерди и Уэлла, которые установили, что при 150 °С ксонотлит имеет растворимость по CaO, равную 0,033 г/л (при 190 °С растворимость $Ca(OH)_2$ втрое ниже, чем при 150 °С).

Рассчитаем активность ионов по схеме (2) с образованием в растворе не метасиликат ($HSiO_3^-$), а ортосиликат-ионов ($H_2SiO_4^{2-}$).

$\Delta G_2^0 = 6 \cdot 203,7 + 6 \cdot 198,3 - 6 \cdot 132,7 - 6 \cdot 251,3 = 108$ ккал;

$\Delta G_3^0 = 6 \cdot 132,7 + 6 \cdot 251,3 - 2189,0 - 5 \cdot 51,0 = -140$ ккал.

Рассчитаем активности ионов, находящихся в равновесии со смесью $Ca(OH)_2 + SiO_2$.

$\Delta G_2 = 108,0$ ккал;

$\lg K_{p2} = -\Delta G_2/RT = -50,94$;

$\lg [Ca^{2+}] = -4,24$;

$[Ca^{2+}] = 5,75 \cdot 10^{-5}$ моль/л = 3 мг/л CaO.

$[H_2SiO_4^{2-}] = [Ca^{2+}] = 5,75 \cdot 10^{-5}$ моль/л = 3,5 мг/л SiO_2 .

Теперь выясним активность ионов в жидкой фазе ксонотлита.

$\Delta G_3 = -140,0$ ккал;

$\lg K_{p3} = -\Delta G_3/RT = -66,03$; $\lg [Ca^{2+}] = -5,5$;

$[Ca^{2+}] = 3,16 \cdot 10^{-6}$ моль/л = 0,18 мг/л CaO.

$[H_2SiO_4^{2-}] = 1,259 \cdot 10^{-3}$ моль/л = 1,9 мг/л SiO_2 .

Эти величины меньше данных американских исследователей [2, 3, 5], что дает основание предполагать, что при синтезе ксонотлита более вероятна схема (1), при которой гидросиликат-ионы представлены пре-

имущественно HSiO_3^- .

Для количественной оценки соотношения ионов $\text{HSiO}_3^-/\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ используем некоторые результаты расчетов, приведенные выше.

Соотношение активностей ионов, находящихся в равновесии со смесью $\text{Ca(OH)}_2+\text{SiO}_2$:

$$1,122 \cdot 10^{-3} / 5,75 \cdot 10^{-5} = 19,5.$$

Соотношение активностей ионов $\text{HSiO}_3^-/\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ в растворе, находящемся в равновесии с ксонотлитом:

$$1,62 \cdot 10^{-4} / 3,16 \cdot 10^{-6} = 51,3.$$

Из полученных результатов следует, что наблюдается значительное преобладание содержания ионов HSiO_3^- над содержанием ионов $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$.

Анализ полученных результатов приводит к следующим выводам и итогам.

– При повышении температуры с 25 до 150 °С изобарно-изотермический потенциал реакции между Ca(OH)_2 и SiO_2 изменится всего на 10–11 %, что вряд ли может вызвать наблюдаемое на практике резкое ускорение этого процесса при 150 °С. Аналогичный скачок активности при 150 °С наблюдается при гидратации доменных гранулированных шлаков. Из этого следует, что термодинамические расчеты не противоречат гипотезе, высказанной в диссертации М.В. Кафтаевой [8] о том, что при 150 °С наблюдается эффект Хэдваля, обусловленный фазовым превращением β-кварца в низкотемпературную модификацию тридимита.

– Показано, что лимитирующей стадией взаимодействия Ca(OH)_2 и SiO_2 является растворение последних в жидкой фазе с образованием ионов кальция и кремнекислоты. В связи с этим добавление в сырьевые смеси портландцемента, доменных гранулированных шлаков, некоторых топливных зол, электролитов, обладающих высокой растворимостью в смесях с гидроксидом кальция, должно ускорять и облегчать синтез ксонотлита в автоклаве. Этот вывод подтверждается практическими данными и дает возможность вести научно-обоснованный поиск новых добавок – интенсификаторов производства известково-силикатных материалов автоклавного твердения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бутт, Ю. М. Твердение вяжущих при повышенных температурах / Ю. М. Бутт, Л. Н. Рашкович. – М. : Стройиздат, 1965. – 222 с.

2. Бабушкин, В. И. Термодинамика силикатов / В. И. Бабушкин, Г. М. Матвеев, О. П. Мчедлов-Петросян. – М. : Стройиздат, 1972. – 352 с.

3. Бабушкин, В. И. Термодинамика силикатов / В. И. Бабушкин, Г. М. Матвеев, О. П. Мчедлов-Петросян. – М. : Стройиздат, 1986. – 424 с.

4. Наумов, Г. В. Справочник термодинамических величин / Г. В. Наумов, Б. Н. Рыженко, И. Л. Ходаковский. – М. : Атомиздат, 1971. – 240 с.

5. Тейлор, Х. С. Химия цемента / Х. С. Тейлор. – М. : Мир, 1996. – 560 с.

6. Hong, S.-Y. Phase relations in the $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ system to 200 °C at saturated steam pressure / S.-Y. Hong, F. P. Glasser // Cement and Concrete Research. – 2004. – Vol. 34, Issue 9. – P. 1529–1534.

7. Matsui, K. In situ time-resolved X-ray diffraction of tobermorite formation in autoclaved aerated concrete: Influence of silica source reactivity and Al addition / K. Matsui, J. Kikuma, M. Tsunashima, T. Ishikawa, S. Matsuno, A. Ogawa, M. Sato // Cement and Concrete Research. – 2011. – Vol. 41, Issue 5. – P. 510–519.

8. Кафтаева, М. В. Теоретическое обоснование совершенствования автоклавной технологии производства энергоэффективных газосиликатов : дис. ... д-ра техн. наук. – Белгород : БГТУ, 2013. – 299 с.

9. Сватовская, Л. В. Термодинамический аспект прочности цементных систем / Л. В. Сватовская // Цемент. – 1996. – С. 34–35.

10. Рахимбаев, Ш. М. О расчете эффективных зарядов ионов по термохимическим данным / Ш. М. Рахимбаев // Журнал физической химии, XXXIX. – 1965. – № 2. – С. 352–355; XL. – 1966. – № 12. – С. 3089–3091.

11. Кафтаева М. В., Комарова Н. Д., Рудакова Д. С. Расширение области применения и комплектности изделий из газосиликата. Теория и практика науки третьего тысячелетия. Сборник научных докладов XXII-ой Региональной научно-практической конференции / Редкол. В. Л. Курбатов, Н. Д. Комарова, И. М. Кондраков [и др.]. – Минеральные Воды : Копир. множ. бюро СКФ БГТУ им. В. Г. Шухова, 2015. – С. 36–39.

12. Рахимбаев, Ш. М. О влиянии основности и пористости на прочностные характеристики силикатных материалов / Ш. М. Рахимбаев, М. В. Кафтаева, В. Л. Курбатов, Н. Д. Комарова, А. В. Теличко // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 3, ч. 1. – С. 35–38.

Кафтаева М.В. – доктор технических наук, доцент. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» г. Белгород.

E-mail: kaftaeva61@yandex.ru.

Рахимбаев Ш.М. – доктор технических наук, профессор. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» г. Белгород.

E-mail: kaftaeva61@yandex.ru.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕАКЦИИ ОБРАЗОВАНИЯ КСОНОТЛИТА
ИЗ ИЗВЕСТКОВО-КРЕМНЕЗЕМИСТОГО ВЯЖУЩЕГО ПРИ АВТОКЛАВНОМ ТВЕРДЕНИИ

Комарова Н.Д. – кандидат технических наук, доцент. Северо-кавказский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» г. Минеральные Воды.

E-mail: natalia.komarova.2014@mail.ru.

Курбатов В.Л. – доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор. Северо-кавказский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» г. Минеральные Воды.

E-mail: kurbatov_bgtu@list.ru.