

- prof. L. P. Kuleva studentov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2013, vol. 1, pp. 48–49 (in Russian).
5. Samchenko S. V., Zorin D. A., Borisenkova I. V. Influence of dispersion alumina slag and sulfoaluminate clinker on the structure formation of cement stone. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 12–14 (in Russian).
 6. Samchenko S. V., Krivoborodov Yu. R. Influence of dispersion special cement on the structure of hardening stone. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova*, 2003, vol. 2, no. 5, pp. 238–240 (in Russian).
 7. Samchenko S. V., Makarov E. M. Modification of the macro- and microstructure of composite materials calcium hydrosilicates. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*, 2013, vol. 20, no. 4, pp. 20–24 (in Russian).
 8. Samchenko S. V. The role of low-basic calcium hydrosilicates in the synthesis of the strength of cement. *Sovremennye problemy stroitel'nogo materialovedeniya. Materialy sed'mykh akademicheskikh chteniy RAASN*. P. 1. Belgorod, 2001, pp. 469–478 (in Russian).
 9. Samchenko S. V., Belimova O. A., Lyutikova T. A. Influence of microsilica on the properties of water-resistant magnesia binders. *Tsementnaya promyshlennost'*. Moscow: VNIIESM, 1999, is. 4, pp. 15–20 (in Russian).
 10. Samchenko S. V., Makarov E. M. Carbonation of hydrated constituents of Portland cement, aluminate and sulfoaluminate cements. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*, 2013, vol. 20, no. 3, pp. 27–29 (in Russian).
 11. Samchenko S. V. *Rol' ettringita v formirovani i genezise struktury kamnya spetsial'nykh tsementov* [The role of ettringite in the formation and the genesis of the stone structure of special cements]. Moscow: RKhTU im. D. I. Mendeleeva, 2005, 154 p (in Russian).
 12. Kouznetsova T. V., Samchenko S. V. *Mikroskopiya materialov tsementnogo proizvodstva* [Microscopy of materials of cement production]. Moscow: MIKKhIS, 2007, 304 p (in Russian).

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГИДРАТАЦИИ АЛИТА И БЕЛИТА

И. Ш. Рахимбаев, БГТУ им. В. Г. Шухова, г. Белгород

Ключевые слова: алит, белит, гидратация, свободная энергия, активность ионов

Key words: alite, belite, hydration, free energy, ion activity

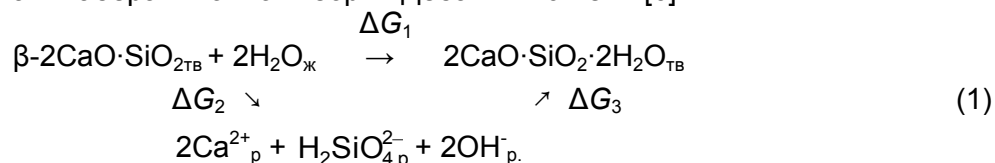
Исследования, посвященные процессам гидратации и твердения минералов, входящих в состав портландцемента, доменных гранулированных шлаков и других силикатов и алюминатов кальция, ведутся уже более 100 лет. В этом направлении достигнуты большие успехи, особенно в вопросах идентификации и расшифровки состава и структуры гидратных соединений [1]. Значительно меньше внимания уделяется химическим и физико-химическим аспектам гидратации, гидролиза и гидратного фазообразования компонентов упомянутых неорганических вяжущих с водой. Данная работа посвящена этим вопросам.

Необходимо отметить, что белит ($\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), алит ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) и другие минералы, обладающие вяжущими свойствами, представляют собой соли слабых кремниевых кислот и сильного основания – оксида кальция. В соответствии с теорией кислотно-основных взаимодействий [2, 3] при затворении силикатов кальция водой должны образовываться преимущественно кислые соли кальция. Это относится прежде всего к низкоосновным гидросиликатам кальция тоберморитовой группы. По данным Н. В. Белова [4], в них анион имеет состав $\text{Ca}_{10}(\text{OH})_6[\text{Si}_{12}\text{O}_{31}]^{14-}$. Результаты расшифровки термограмм слоистых гидроалюминатных и алюмосиликатных гидратных фаз цементного камня [5] показывают, что преобразования, происходящие при затворении силикатов кальция водой, обусловлены эффектом Хедвалла. Температуры термических эффектов на кривых ДТА тоберморита близки к температуре образования тридимита (от 800 до 870 °С в зависимости от количества и состава щелочных компонентов в системе). На термограммах высокоосновных гидросиликатов кальция фиксируется эндозффект при температуре 500–550 °С (аналогично портландиту $\text{Ca}(\text{OH})_2$), что свидетельствует о наличии в их составе группы $-\text{CaOH}$. Иными словами, они являются основными солями кальция, что согласуется с теоретическими представлениями В. С. Соболева [2].

Рассмотрим состав гидратных фаз, образующихся в процессе гидратации клинкерных минералов при комнатной температуре (25 °С). К сожалению, мнения специалистов по данному вопросу неоднозначны. Так, по утверждению Р. Богга, Ю. М. Бутта и других исследователей, в системах алит – H_2O и белит – H_2O образуется гидросиликат кальция C_2SH_2 ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Между тем некоторые ученые полагают, что C_2SH_2 имеет состав

1,5CaO·SiO₂·1,5H₂O. Можно привести убедительный аргумент в пользу того, что основность гидросиликата C₂SH₂ близка к 2, а не к 1,5. В большинстве публикаций указывается, что в гидратированных в течение 1–6 мес образцах алита либо портландцемента содержание свободного гидроксида кальция (портландита) не превышает 20–25%. Расчеты показывают, что при гидратации алита с образованием C₂SH₂ выделяется 24,6% портландита в пересчете на CaO, в то время как образование C_{1,5}SH_{1,5} сопровождается кристаллизацией 36,8% CaO.

Опираясь на изложенные выше исходные посылки, рассмотрим основные стадии гидратации клинкерных минералов, в частности белита, с использованием метода термодинамических циклов Борна – Габера и ионной теории Дебая – Хюккеля [6]:



Здесь $\Delta G_1 = \Delta G_2 + \Delta G_3$; ΔG_1 характеризует изменение изобарно-изотермического потенциала в результате превращения смеси белита с водой в двухосновный гидросиликат кальция, находящийся в твердом состоянии, ΔG_2 – то же при растворении белита в воде с образованием ионов кальция, ортокремниевой кислоты и гидроксидов в растворе, ΔG_3 – изменение свободной энергии при образовании твердого гидросиликата кальция из ионов, находящихся в растворе.

Рассчитаем их численные значения, взяв исходные данные из работы [7]: $\Delta G_1 = 524,2 + 2 \cdot 56,7 - 641 = -3,4$ ккал; $\Delta G_2 = 524,2 - 2 \cdot 132,2 - 285,5 + 2 \cdot 56,7 - 2 \cdot 37,6 = 12,5$ ккал; $\Delta G_3 = 2 \cdot 132,2 + 285,5 + 2 \cdot 37,6 - 641 = -15,9$ ккал.

Для проверки соответствия полученных величин ΔG реальным определим активность ионов, находящихся в равновесии с белитом: $\Delta G_2 = 12,5$ ккал; $\lg K_{p2} = -\Delta G_2/RT = -12,5/RT = -9,16$; $K_{p2} = [\text{Ca}^{2+}]^2 \cdot [\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] \cdot [\text{OH}^{-}]^2 = [\text{Ca}^{2+}]^5 \cdot 0,5$; $5 \lg[\text{Ca}^{2+}] - 0,3 = -9,16$; $\lg[\text{Ca}^{2+}] = -1,77$; $[\text{Ca}^{2+}] = 1,7 \cdot 10^{-2}$ моль/л = 0,95 г/л CaO; $[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 0,5[\text{Ca}^{2+}] = 0,51$ г/л SiO₂; $[\text{OH}^{-}] = [\text{Ca}^{2+}] = 1,7 \cdot 10^{-2}$ моль/л; pH = 12,2.

Рассчитаем равновесную растворимость белита с использованием полученных выше значений активности ионов a . Для этого необходимо вычислить коэффициенты активности, базируясь на теории ионных взаимодействий в растворах электролитов Дебая – Хюккеля [6]:

$$\gamma_{\text{Ca}^{2+}} = 0,5359; \gamma_{\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}} = 0,5359; \gamma_{\text{OH}^{-}} = 0,847;$$

$$c = a / \gamma, \quad (2)$$

$$c_{\text{Ca}^{2+}} = 0,95/0,5359 = 1,77 \text{ г/л CaO}; c_{\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}} = 0,51/0,5359 = 0,95 \text{ г/л SiO}_2; c_{\text{OH}^{-}} = 1,7 \cdot 10^{-2}/0,847 = 2,03 \cdot 10^{-2} \text{ моль/л}; \text{pH} = 12,3.$$

Аналогично определим равновесную растворимость гидросиликата кальция по схеме (1): $\Delta G_3 = -15,9$ ккал; $\lg K_{p3} = -\Delta G_3/RT = -11,66$; $\lg[\text{Ca}^{2+}] = -2,12$; $[\text{Ca}^{2+}] = 5,37 \cdot 10^{-3}$ моль/л = 0,31 г/л CaO; $[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 0,15$ г/л SiO₂; $[\text{OH}^{-}] = [\text{Ca}^{2+}] = 5,37 \cdot 10^{-3}$ моль/л; pH = 11,7;

$$\gamma_{\text{Ca}^{2+}} = 0,54; \gamma_{\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}} = 0,54; \gamma_{\text{OH}^{-}} = 0,86; c_{\text{Ca}^{2+}} = 0,61 \text{ г/л CaO}; c_{\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}} = 0,28 \text{ г/л SiO}_2; c_{\text{OH}^{-}} = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л}; \text{pH} = 11,7. \text{ Полученные результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [8].}$$

Рассмотрим еще один способ верификации схемы гидратации белита (1). Для этого, используя численное значение суммарной величины изменения энергии при гидратации белита $\Delta G_1 = -3,4$ ккал, рассчитаем энтальпию (теплоту) гидратации ΔH :

$$\Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S, \quad (3)$$

где T – температура среды (298 K); ΔS – изменение энтропии системы при гидратации белита; $\Delta S^0 = S^0_{\text{C}_2\text{SH}_2} - S^0_{\beta} \cdot 2S - 2S^0_{\text{H}_2\text{O}}$.

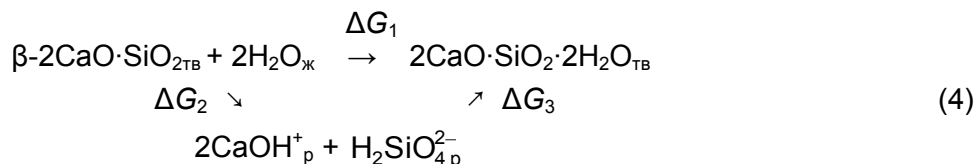
Для расчета ΔS необходимо знать энтропию C₂SH₂. Воспользуемся данными по дженниту, внося поправку на разницу в составе: $S^0_{298} = 38,4$ кал/(моль·K). Отсюда $\Delta S = 38,4 - 30,5 - 2 \cdot 16,7 = -25,6$ кал/(моль·K); $\Delta H = -3,4 - 25,6 \cdot 10^{-3} \cdot 298 = -11,0$ ккал/моль; $M_{\text{C}_2\text{S}} = 172$.

Определим удельную энтальпию (тепловыделение): $h = \Delta H/M = 11,0 \cdot 10^3/172 = 64$ кал/г.

По данным литературных источников, экспериментальные величины тепловыделения для белита через полгода-год гидратации, когда степень гидратации составляет около 0,9,

изменяются от 60 до 62 ккал/г, т. е. согласие расчетных величин с экспериментальными в этом случае удовлетворительное.

Рассмотрим схему гидратации белита с образованием в растворе не ионов Ca^{2+}_p , а CaOH^+_p :



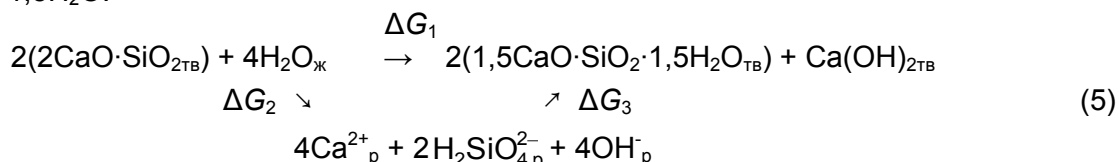
$\Delta G_1 = -3,4$ ккал; $\Delta G_2 = 8,9$ ккал; $\Delta G_3 = -12,3$ ккал.

Рассчитаем активность ионов, находящихся в равновесии с белитом: $\lg K_{p2} = -\Delta G_2/RT = -8,9/RT = -6,52$; $K_{p2} = [\text{CaOH}^+]^2 \cdot [\text{H}_2\text{SiO}^{2-}_{4\text{р}}] = [\text{CaOH}^+_p]^2 \cdot [0,5\text{CaOH}^+]$; $\lg [\text{CaOH}^+] = -2,07$; $[\text{CaOH}^+] = 8,5 \cdot 10^{-2}$ моль/л = 0,47 г/л CaO; $[\text{H}_2\text{SiO}^{2-}_{4\text{р}}] = 0,5[\text{Ca}^{2+}] = 0,255$ г/л SiO_2 .

Определим равновесную растворимость гидросиликата кальция C_2SH_2 : $\Delta G_3 = -12,3$ ккал; $\lg K_{p3} = -\Delta G_3/RT = -9,0$; $\lg [\text{Ca}^{2+}] = -4,35$; $[\text{Ca}^{2+}] = 4,47 \cdot 10^{-4}$ моль/л = 0,025 г/л CaO; $[\text{H}_2\text{SiO}^{2-}_{4\text{р}}] = 0,013$ г/л SiO_2 .

Полученные величины активности ионов гидросиликата кальция меньше предыдущих и существенно отличаются от экспериментальных значений, поэтому данная схема гидратации белита маловероятна.

Рассмотрим схему гидратации белита с образованием гидросиликата кальция $1,5\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}$:



$\Delta G_1 = -1053,0 - 214,4 + 2 \cdot 524,3 + 4 \cdot 56,7 = 8,0$ ккал; $\Delta G_2 = 32,8$ ккал; $\Delta G_3 = -24,8$ ккал.

Рассчитаем активность ионов, находящихся в равновесии с белитом: $K_{p2} = [\text{Ca}^{2+}]^4 \cdot [\text{H}_2\text{SiO}^{2-}_{4\text{р}}]^2 \cdot [\text{OH}^-]^4$; $10 \lg [\text{Ca}^{2+}] = -23,4$; $\lg [\text{Ca}^{2+}] = -2,34$; $[\text{Ca}^{2+}] = 4,57 \cdot 10^{-3}$ моль/л = 0,26 г/л CaO; $[\text{H}_2\text{SiO}^{2-}_{4\text{р}}] = 0,5[\text{Ca}^{2+}] = 0,137$ г/л SiO_2 ; $\lg [\text{OH}^-] = -2,34$; $\text{pH} = 11,7$.

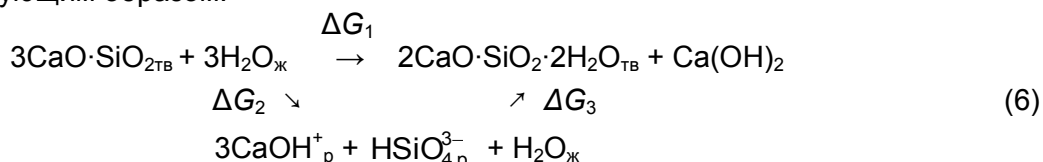
Близость значений активности ионов Ca^{2+} , $\text{H}_2\text{SiO}^{2-}_{4\text{р}}$ и pH среды по схемам (1) и (5) свидетельствует о равной вероятности образования при гидратации белита гидросиликатов C_2SH_2 и $\text{C}_{1,5}\text{SH}_{1,5}$. Однако свободная энергия гидратации C_2S с образованием $\text{C}_{1,5}\text{SH}_{1,5}$ ΔG_1 имеет положительный знак (+8,0 ккал), поэтому расчетное значение теплоты гидратации не согласуется с экспериментальным. Возможно, в данном случае справочная величина ΔG^0_{298} гидросиликата кальция $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$, равная 1053 ккал/моль [7], значительно занижена.

Выполним расчет по схеме (5), используя уточненные значения ΔG^0 образования гидросиликата $\text{C}_{1,5}\text{SH}_{1,5}$. Примем для $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ не справочное значение ΔG^0_{298} (1053 ккал/моль), а 1071 ккал/моль. Тогда $\Delta G_1 = -10,0$ ккал; $\Delta G_2 = 25,2$ ккал; $\Delta G_3 = -35,2$ ккал; $\lg K_{p3} = -\Delta G_3/RT = -25,8$; $\lg [\text{Ca}^{2+}] = -2,52$; $[\text{Ca}^{2+}] = 3,02 \cdot 10^{-3}$ моль/л = 0,17 г/л CaO; $[\text{H}_2\text{SiO}^{2-}_{4\text{р}}] = 3,02 \cdot 10^{-3}$ моль/л = 0,09 г/л SiO_2 ; $\text{pH} = 11,5$; $\gamma_{\text{Ca}^{2+}} = 0,64$; $c_{\text{Ca}^{2+}} = 0,27$ г/л CaO; $c_{\text{H}_2\text{SiO}^{2-}_{4\text{р}}} = 0,14$ г/л SiO_2 ; $\text{pH} = 11,6$.

Рассчитаем тепловыделение по схеме (5): $\Delta G_1 = -10$ ккал; $\Delta S_1 = 74,6 + 20,0 - 2 \cdot 30,5 - 4 \cdot 16,7 = -33,2$ ккал/(моль·К); $\Delta H_1 = -10 - 33,2 \cdot 0,298 = -19,8$ ккал. Это тепловыделение соответствует гидратации двух молей C_2S . Отсюда $h = 57,6$ ккал/г C_2S . Полученное значение тепловыделения меньше экспериментального, но ненамного. Однако концентрация ионов Ca^{2+}_p существенно меньше экспериментального значения (1,19 г/л CaO). Это обусловлено тем, что в противоположность схеме (1), где при гидратации белита образуется лишь C_2SH_2 , по схеме (5) продуктом гидратации является смесь $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ и $\text{Ca}(\text{OH})_2$, поэтому в последнем случае концентрация извести в жидкой фазе должна быть не менее 1 г/л CaO. Кроме того, по схеме (1) в системе практически не образуется свободный гидроксид кальция, а по схеме (5) его количество составляет 16,7%, что не согласуется с экспериментальными данными.

При гидролизе и гидратации алита выделяется больше гидроксида кальция, чем при гидролизе и гидратации белита, поэтому предполагаем, что степень диссоциации кремне-

кислого иона в этом случае выше. Уравнение реакции гидролиза и гидратации C_3S можно представить следующим образом:



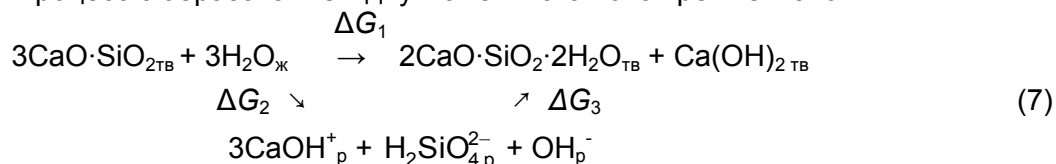
$\Delta G_1 = -641,0 - 214,4 + 666,0 + 3 \cdot 56,7 = -19,3$ ккал; $\Delta G_2 = 666,0 + 3 \cdot 171,6 - 261,4 - 56,7 = 3,2$ ккал; $\Delta G_3 = -641,0 - 214,4 + 171,6 + 261,4 + 56,7 = -22,5$ ккал.

Рассчитаем активность ионов, находящихся в равновесии с алитом: $\Delta G_2 = 3,2$ ккал; $\lg K_{p2} = -2,34$; $K_{p2} = [CaOH^+]^3 \cdot [1/3 HSiO_4^{3-}] = 0,33 [CaOH^+]^4$; $\lg K_{p2} = 4 \lg [CaOH^+] - 0,48$; $4 \lg [CaOH^+] = -2,34 - 0,48$; $4 \lg [CaOH^+] = -1,86$; $\lg [CaOH^+] = -0,465$; $[CaOH^+] = 0,29$ моль/л = 16,2 г/л CaO.

Определим равновесную растворимость гидросиликата кальция C_2SH_2 по величине $\Delta G_3 = -22,5$ ккал: $\lg K_{p3} = -15,76$; $K_{p3} = [CaOH^+]^3 \cdot [1/3 HSiO_4^{3-}] = 0,33 [CaOH^+]^4$; $[CaOH^+] = 1,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л = $8,4 \cdot 10^{-3}$ г/л CaO.

Полученные значения активности ионов кальция на два порядка ниже экспериментальных величин, поэтому схема (6) нереальна.

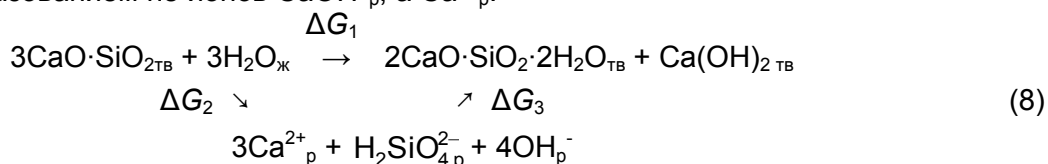
Рассмотрим процесс с образованием двухвалентного иона кремнекислоты:



$\Delta G_1 = 666,0 + 3 \cdot 56,7 - 641,0 - 214,3 = -19,2$ ккал; $\Delta G_2 = 666,0 + 3 \cdot 56,7 - 3 \cdot 171,6 - 285,5 - 37,6 = -1,8$ ккал; $\Delta G_3 = 3 \cdot 171,6 + 285,5 + 37,6 - 641,0 - 214,3 = -17,4$ ккал.

Рассчитаем активность гидросиликата кальция C_2SH_2 в смеси с $Ca(OH)_2$: $\lg K_{p3} = -12,0$; $K_{p3} = [CaOH^+]^3 \cdot [H_2SiO_4^{2-}] \cdot [OH^-]$; $5 \lg [CaOH^+] = -11,05$; $[CaOH^+] = 6,16 \cdot 10^{-3}$ моль/л = 0,35 г/л CaO; $[H_2SiO_4^{2-}] = 1/3 [CaOH^+] = 2,03 \cdot 10^{-3}$ моль/л = 0,12 г/л SiO_2 ; pH = 11,3.

Полученные значения активности ионов, находящихся в равновесии со смесью гидросиликата кальция C_2SH_2 и $Ca(OH)_2$, чрезмерно занижены, поэтому рассмотрим другую схему процесса – с образованием не ионов $CaOH^+_p$, а Ca^{2+}_p :



$\Delta G_1 = -19,2$ ккал; $\Delta G_2 = 666,0 + 3 \cdot 56,7 - 3 \cdot 132,2 - 285,5 - 4 \cdot 37,6 = 3,6$ ккал; $\Delta G_3 = 3 \cdot 132,2 + 285,5 + 4 \cdot 37,6 - 640 - 214,3 = -22,8$ ккал.

Вычислим равновесную растворимость алита: $\Delta G_2 = 3,6$ ккал; $K_{p2} = [Ca^{2+}]^3 \cdot [H_2SiO_4^{2-}] \cdot [OH^-]^4 = [Ca^{2+}]^8$; $[Ca^{2+}] = 0,467$ моль/л = 26,2 г/л CaO.

Таким образом, рассчитанные численные значения активности ионов, образующихся при гидратации алита, на полтора порядка больше величины растворимости гидроксида кальция.

Теперь произведем расчет равновесной растворимости гидросиликата кальция C_2SH_2 в смеси с $Ca(OH)_2$: $\Delta G_3 = -22,8$ ккал; $\lg K_{p3} = -16,7$; $\lg [Ca^{2+}_p] = -2,08$; $[Ca^{2+}] = 8,32 \cdot 10^{-3}$ моль/л = 0,46 г/л CaO; $[H_2SiO_4^{2-}] = 0,15$ г/л SiO_2 ; $[OH^-_p] = 1,1 \cdot 10^{-2}$ моль/л; pH = 12,0; $\gamma_{Ca^{2+}} = 0,5359$; $\gamma_{H_2SiO_4^{2-}} = 0,5359$; $\gamma_{OH^-} = 0,86$; $c_{Ca^{2+}} = 0,86$ г/л CaO; $c_{H_2SiO_4^{2-}} = 0,43$ г/л SiO_2 ; $c_{OH^-} = 0,26$ моль/л; pH = 12,3.

Полученные результаты находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными, поэтому принимаем схему (8) как наиболее вероятную для гидратации алита.

Проверим корректность расчетов гидратации алита другим способом – по величине тепловыделения (схема расчета изложена выше на примере белита): $\Delta S^0 = S^0_{C_2SH_2} +$

$S^0_{\text{Ca(OH)}_2} - S^0_{\text{C}_3\text{S}} - 3S^0_{\text{H}_2\text{O}} = 19,6 + 33,5 \cdot 298 \cdot 10^{-3} = -33,5 \text{ кал}/(\text{моль} \cdot \text{K}); \Delta H = 19,6 + 33,5 \cdot 10^{-3} \cdot 298 = 29,7 \text{ ккал}/\text{моль}; M_{\text{C}_2\text{S}} = 172; h = \Delta H/M = 29,7 \cdot 10^3/228 = 130 \text{ кал}/\text{г}.$

Полученная величина удельного тепловыделения удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными, которые составляют 117–124 кал/г при неполной гидратации алита (90–95%) [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Тейлор Х. С. Химия цемента. – М.: Мир, 1996. – 560 с.
2. Соболев В. С. Введение в минералогию силикатов. – Львов: Изд-во Львовского гос. ун-та, 1949. – 230 с.
3. Урусов В. С. Энергетическая кристаллохимия. – М.: Наука, 1976. – 336 с.
4. Белов Н. В. Очерки по структурной минералогии. – М.: Недра, 1976. – 344 с.
5. Рахимбаев Ш. М. О природе экзотермического эффекта каолинита // Термический анализ: тез. докл. VII Всесоюз. сов. – Рига: Зинатне, 1979. – Т. 2. – 168 с.
6. Рахимбаев Ш. М., Рахимбаев И. Ш. Термодинамический анализ гидратации гипсовых вяжущих // Научные технологии и инновации: сб. докладов юбилейной Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 60-летию БГТУ им. В. Г. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. – Ч. 3. – С. 320–324.
7. Бабушкин В. И., Матвеев Г. М., Мchedlov-Петросян О. П. Термодинамика силикатов. – М.: Стройиздат, 1986. – 408 с.
8. Торопов Н. А. Химия цемента. – М.: Стройиздат, 1956. – 272 с.

REFERENCES

1. Teylor Kh. S. *Khimiya tsementa* [Chemistry of cement]. Moscow: Mir, 1996, 560 p (in Russian).
2. Sobolev V. S. *Vvedenie v mineralogiyu silikatov* [Introduction to mineralogy of silicates]. L'vov: Izd-vo L'vovskogo un-ta, 1949, 230 p (in Russian).
3. Urusov V. S. *Energeticheskaya kristallohimiya* [Energy crystal chemistry]. Moscow: Nauka, 1976, 336 p (in Russian).
4. Belov N. V. *Ocherki po strukturnoy mineralogii* [Essays on structural mineralogy]. Moscow: Nedra, 1976, 344 p (in Russian).
5. Rakhimbaev Sh. M. On the nature of the exothermic effect of kaolinite. *Termicheskiy analiz: tez. dokl. VII Vsesoyuz. sov.* Riga: Zinatne, 1979, vol. 2, 168 p (in Russian).
6. Rakhimbaev Sh. M., Rakhimbaev I. Sh. Thermodynamic analysis of hydration of gypsum binders. *Naukoemkie tekhnologii i innovatsii: sb. докладov yubileynoy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoy 60-letiyu BGTU im. V. G. Shukhova.* Belgorod: Izd-vo BGTU, 2014, p. 3, pp. 320–324 (in Russian).
7. Babushkin V. I., Matveev G. M., Mchedlov-Petrosyan O. P. *Termodinamika silikatov* [Thermodynamics of silicates]. Moscow: Stroyizdat, 1986, 408 p (in Russian).
8. Toropov N. A. *Khimiya tsementa* [Chemistry of cement]. Moscow: Stroyizdat, 1956, 272 p (in Russian).

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИФИКАТОРОВ НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТА С ДОБАВКОЙ СУЛЬФОАЛЮМИНАТА КАЛЬЦИЯ

Ю. Р. Кривобородов, Д. А. Ясько, РХТУ им. Д. И. Менделеева, г. Москва

Ключевые слова: сульфоалюминатный цемент, прочность, расширение, водопотребность, схватывание

Key words: sulfoaluminate cement, strength, expansion, water requirement, setting

В последние десятилетия отмечаются значительные достижения в технологии цемента и бетона [1, 2]. Появились новые вяжущие, пластификаторы и модификаторы, дающие возможность регулировать технические свойства указанных материалов [3, 4], расширились знания о структуре и свойствах цементного камня. Использование пластификаторов позволяет снизить водопотребность цементно-песчаного раствора, улучшить его удобоукладываемость и, соответственно, повысить прочность и долговечность бетонных изделий и конструкций. Тем не менее при производстве и применении различных цементов влияние пластификаторов неоднозначно: не исключено неконтролируемое схватывание цемента, воз-