

УДК 666.94:54-41

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ДЕГИДРАТАЦИИ ГЛИНИСТЫХ И СИНТЕЗА КЛИНКЕРНЫХ МИНЕРАЛОВ В ПРИСУТСТВИИ УГЛЕЩЕЛОЧНОЙ ДОБАВКИ

© 2020 г. Н. П. Бушуева^а, *, Н. П. Кудеярова^а, О. А. Панова^а

^аБелгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

*e-mail: px_2011@list.ru

Поступила в редакцию 09.07.2018 г.

После доработки 08.07.2019 г.

Принята к публикации 22.07.2019 г.

Дано теоретическое обоснование влияния углещелочной добавки, изменяющей не только поверхностные свойства дисперсных частиц, но и интенсифицирующей процессы дегидратации глинистых минералов и образования двухкальциевого силиката и метаалюмината кальция. Проведен термодинамический анализ взаимодействия продуктов разложения глин с оксидом кальция в присутствии и без добавки, представлены термодинамические расчеты вероятности образования продуктов разложения глинистых и клинкерных минералов до температуры 1400 К. Введение углещелочного реагента в карбонатно-глинистую смесь позволяет значительно понизить температуру дегидратации глинистых минералов, а процессы взаимодействия веществ в твердой фазе с образованием двухкальциевого силиката и метаалюмината кальция могут протекать на 20–102°С ниже, чем без добавки. Использование термодинамических расчетов позволило теоретически подтвердить эффективность применения такой добавки.

Ключевые слова: глинистые минералы, двухкальциевый силикат, метаалюминат кальция, портландцемент, углещелочная добавка, синтез, дегидратация, декарбонизация, термодинамический анализ

DOI: 10.31857/S0040357120010042

ВВЕДЕНИЕ

При производстве портландцементного клинкера сырьевая смесь состоит в основном из карбонатного и глинистого компонентов [1]. На предприятиях, работающих по мокрому способу, для снижения влажности шламов и улучшения реологических характеристик используются различные добавки. Эффективное использование вводимой углещелочной добавки основывается на научном определении не только оптимального соотношения в смеси, но и воздействия ее на физико-химические процессы синтеза. Экспериментально доказано [2], что введение углещелочного компонента в количестве до 0.9 мас. %, как поверхностно-активного вещества, приводит не только к снижению влажности шлама и улучшению реологических свойств, но и интенсификации процессов дегидратации глинистых минералов, декарбонизации CaCO_3 , содержащегося в известняках, а также образованию на более ранней стадии некоторых минералов портландцементного клинкера.

Поскольку используемые глины содержат различные минералы: монтмориллонит, иллит, гидрослюда, а также каолинит, необходимо оценить

влияние углещелочной добавки при термическом воздействии на процесс удаления из них химически связанной воды и синтеза двухкальциевого силиката и метаалюмината кальция, которые первыми образуются в результате твердофазовых реакций в системе $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Для оценки и сравнения активности глинистых минералов в присутствии углещелочной добавки и в смеси с CaCO_3 были составлены уравнения реакций дегидратации и образования минералов, по которым выполнены термодинамические расчеты. Чтобы определить направление реакции, выбрать наиболее оптимальный режим ее протекания, управлять физико-химическими процессами, применяется термодинамический метод исследования [3]. Величину

свободной энергии Гиббса ΔG_T° рассчитывали путем интегрирования уравнения теплоемкости.

Глинистые минералы относятся к группе слоистых и слоисто-ленточных минералов. Каолинит — самый распространенный глинистый ми-

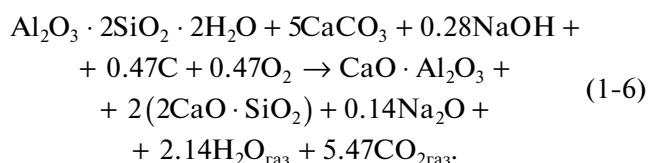
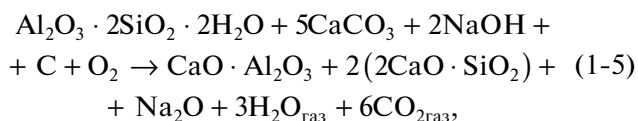
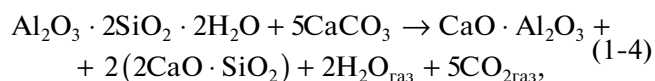
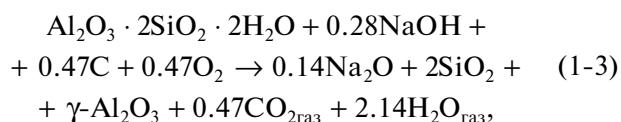
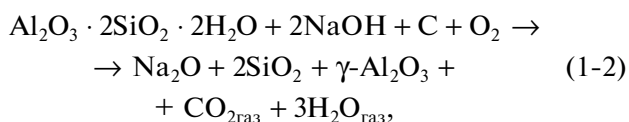
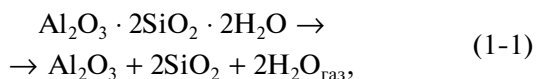
нерал из группы водных алюмосиликатов. Кристаллическая структура состоит из двухслойных пакетов, содержащих один кислородный тетраэдрический слой состава $[\text{Si}_{2n}\text{O}_{5n}]^{2n-}$ и один алюмо-кислородно-гидроксильный октаэдрический слой состава $[\text{Al}_{2n}(\text{OH})_{4n}]^{2n+}$. Оба слоя объединяются в пакет с помощью общих кислородов кремнекислородного слоя [4].

При обжиге процесс дегидратации или удаления химически связанной воды происходит из глинистых минералов в различных температурных интервалах. На кривой нагревания каолинита имеются четыре термических эффекта: один эндотермический при 450–600°C и три экзотермических при 900–950, 1150–1300 и 1210–1320°C [5–7].

По данным дифференциально-термического анализа в каолиновой глине (Латненской) процесс дегидратации протекает в интервалах температур 400–560 и 650–790°C (эндотермические эффекты (–)503.4 и (–)751.3°C) [2].

Угleshелочная добавка, используемая для разжижения цементных шламов, представлена соединениями $\text{C}_{67}\text{H}_{67}\text{O}_{30}\text{N}_3(\text{COOH})_5$ и $\text{Na}(\text{OH})$ с содержанием углерода в количестве 8% и $\text{Na}(\text{OH})$ в количестве 10–16%. Поэтому при исследовании ее влияния, процента введения на процесс дегидратации каолинита, самого распространенного

глинистого минерала, для расчета ΔG_T° были составлены следующие уравнения реакций:



Величина свободной энергии Гиббса ΔG_T° для реакций дегидратации каолинита и образования минералов в системе каолинит– CaCO_3 без и в присутствии угleshелочной добавки может быть рассчитана по следующим уравнениям:

$$\begin{aligned} \Delta G_T^\circ = 162044.68 - 28.12T \ln T + \\ + 41.24 \times 10^{-3}T^2 + 14.895 \times 10^5T^{-1} + 22.91T, \end{aligned} \quad (1-1)$$

$$\begin{aligned} \Delta G_T^\circ = -51816.63 - 72.7T \ln T + \\ + 23.89 \times 10^{-3}T^2 + 12.72 \times 10^5T^{-1} + 476.08T. \end{aligned} \quad (1-2)$$

$$\begin{aligned} \Delta G_T^\circ = 9203.12 - 42.91T \ln T + \\ + 38.57 \times 10^{-3}T^2 + 13.92 \times 10^5T^{-1} + 241.01T, \end{aligned} \quad (1-3)$$

$$\begin{aligned} \Delta G_T^\circ = 791835.41 + 16.35T \ln T + \\ + 3.9 \times 10^{-3}T^2 - 12.69 \times 10^5T^{-1} - 1073.81T, \end{aligned} \quad (1-4)$$

$$\begin{aligned} \Delta G_T^\circ = 146922.62 + 14.68T \ln T + \\ + 4.49 \times 10^{-3}T^2 - 8.92 \times 10^5T^{-1} - 432.58T, \end{aligned} \quad (1-5)$$

$$\begin{aligned} \Delta G_T^\circ = 630953.3 + 5.01T \ln T + \\ + 1.26 \times 10^{-3}T^2 - 13.65 \times 10^5T^{-1} - 906.58T. \end{aligned} \quad (1-6)$$

Дегидратация каолинита с образованием оксидов может происходить при температурах выше 1304 К (табл. 1). Введение угleshелочной добавки интенсифицирует этот процесс, а с учетом процента введения температура снижается на 319°C.

Результаты расчетов величины ΔG_T° в зависимости от температуры (табл. 1) подтверждают интенсификацию процесса дегидратации каолинита – глинистого минерала в присутствии угleshелочной добавки [2]. Вероятность образования продуктов разложения каолинита и образования соединений в присутствии добавки без учета процента введения (реакция (1-2)) значительно выше, чем с учетом (реакция (1-3)), но в обоих случаях она присутствует. Температура образования двухкальциевого силиката $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ снижается на 102°C.

Монтмориллонит – широко распространённый глинистый минерал из группы смектитов подкласса слоистых силикатов. Структура монтмориллонита строится двумя тетраэдрическими кремнекислородными слоями, разделёнными в центре октаэдрическим алюмокислородным слоем. Отличие в структуре – симметричное сложение пачек слоев. Между пакетами размещаются молекулы межслоевой воды и атомы обменных оснований Ca, Na и др. Характерно большое расстояние между пачками слоёв, которое равно приблизительно 1.4 нм. Пакеты разделены слоя-

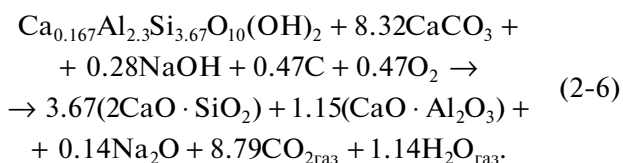
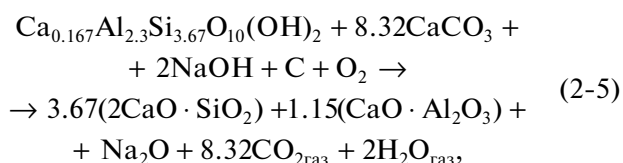
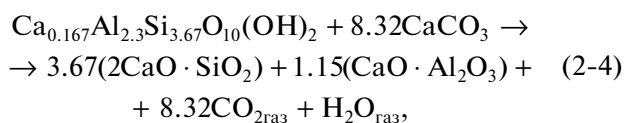
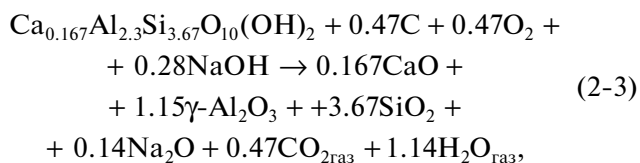
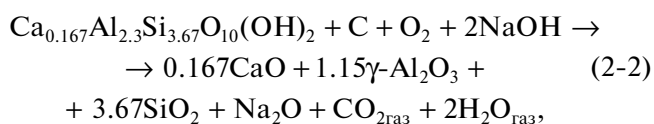
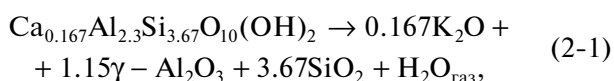
Таблица 1. Величина ΔG_T° для уравнений реакций (1-1)–(1-6)

Реакция	ΔG_T° , кДж/моль					
	600 K	800 K	900 K	1000 K	1200 K	1400 K
1	85.14	58.35	45.63	33.37	10.92	–9.01
2	–34.62	–42.58	–47.50	–52.93	–64.62	–74.46
3	5.24	3.92	1.69	–0.33	–2.76	–3.33
4	152.72	21.07	–72.78	–102.52	–158.41	–213.38
5	–56.12	–118.93	–149.91	–180.62	–270.85	–360.90
6	104.42	–68.44	–154.80	–210.00	–398.33	–410.30

ми молекул воды, толщина которых может изменяться в широких пределах. Химический состав непостоянный, сильно зависит от варьирующего содержания воды, количество которой колеблется от 12 до 24%.

По своему химическому составу монтмориллонит содержит, мас. %: оксиды магния (MgO) – 4–9, алюминия (Al_2O_3) – 11–22, железа (Fe_2O_3) – более 5, H_2O – 12–24; кроме того, в минерале присутствует оксид калия (K_2O), оксид натрия (Na_2O) и оксид кальция (CaO) (до 3.5 мас. %) [4].

При обжиге монтмориллонита происходит удаление химически связанной воды (по данным ДТА наблюдается при температурах 500–760 и 800–860°C, а в монтмориллонитово-гидрослюдистой глине (месторождение Белгородской области) – 380–500, 560–590, 620–680 и 820–890°C – эндотермические эффекты (–)456.6; (–)574.4; (–)642.5 и (–)745.8°C) [8]. Реакции дегидратации минерала с образованием оксидов, а также образования двухкальциевого силиката и метаалюмината кальция приведены без и с введением углещелочной добавки с учетом соотношения исходных компонентов:



Зависимость ΔG_T° от температуры для этих реакций следующая:

$$\Delta G_T^\circ = 1228752.51 + 15.15T \ln T + 29.15 \times 10^{-3}T^2 + 4.05 \times 10^5T^{-1} - 273.12T, \quad (2-1)$$

$$\Delta G_T^\circ = 39785.36 + 67.2T \ln T + 12.8 \times 10^{-3}T^2 + 2.86 \times 10^5T^{-1} - 1516.63T, \quad (2-2)$$

$$\Delta G_T^\circ = 62503.13 + 4.0T \ln T + 26.48 \times 10^{-3}T^2 + 3.07 \times 10^5T^{-1} - 186.10T, \quad (2-3)$$

$$\Delta G_T^\circ = 1223059.7 + 76.6T \ln T + 27.33 \times 10^{-3}T^2 + 40.03 \times 10^5T^{-1} - 2068.75T, \quad (2-4)$$

$$\Delta G_T^\circ = 1002642.16 + 15.88T \ln T + 9.98 \times 10^{-3}T^2 - 42.2 \times 10^5T^{-1} - 1572.05T, \quad (2-5)$$

$$\Delta G_T^\circ = 1062232.57 + 65.46T \ln T + 24.66 \times 10^{-3}T^2 + 41.0 \times 10^5T^{-1} - 1744.64T. \quad (2-6)$$

Результаты расчетов ΔG_T° в температурном интервале 600–1400 K представлены в табл. 2.

Потеря химически связанной воды из структуры монтмориллонита, разрушение его структуры с образованием оксидов происходит при температурах выше 1080 K. Присутствие углещелочной добавки значительно интенсифицирует этот процесс, а с учетом процента ее введения температу-

Таблица 2. Величина ΔG_T° для уравнений реакций (2-1)–(2-6) с участием монтмориллонита

Реакция	ΔG_T° , кДж/моль					
	600 K	800 K	900 K	1000 K	1200 K	1400 K
1	124.41	101.13	90.50	86.06	–62.4	–47.55
2	65.18	–41.79	–101.20	–168.30	–222.12	–239.05
3	23.75	–8.30	–37.08	–66.41	–124.20	–196.88
4	292.50	58.51	–143.38	–284.98	–571.37	–840.25
5	116.95	–169.02	–311.62	–453.92	–737.86	–1020.72
6	268.86	26.99	–91.91	–209.52	–442.31	–671.36

ра разложения снижается до 760 К. В смеси с CaCO_3 вероятность образования $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ присутствует при температурах выше 842 К; с введением углещелочной добавки и с учетом оптимального процента ее введения температура синтеза минералов снижается на 20°C.

Основой структуры слоистых силикатов являются сетки кремнекислородных тетраэдров. Они располагаются параллельно друг другу и чередуются с плоскими сетками другого состава, образуя пакеты слоев. Основной элемент структуры слюды – трехслойный пакет, в котором между двумя кремнекислородными $[\text{Si}_4\text{O}_{10}]^{4-}$ или алюмокремнекислородными $[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]^{4-}$ тетраэдрами располагается слой октаэдров. В зависимости от того, какими катионами образованы октаэдры, различают три- и диоктаэдрические слюды [4].

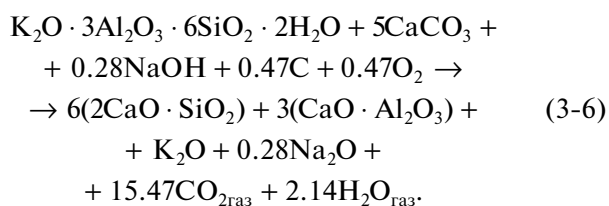
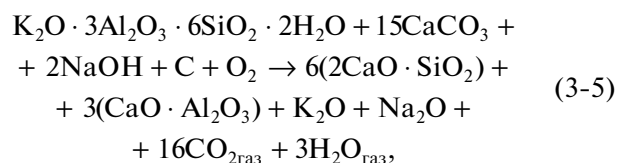
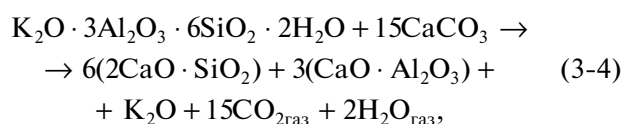
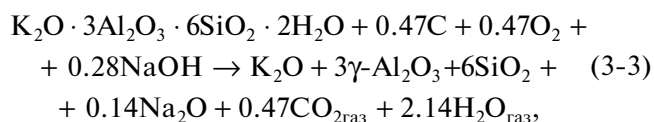
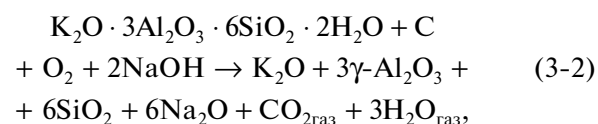
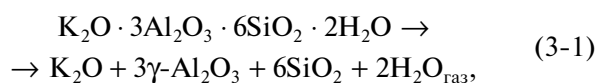
В минералах биотита и мусковита алюминий представлен частично как катион, и часть его входит в анионный радикал, например, в мусковите, структурная формула которого $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$. Размер тетраэдров $[\text{AlO}_4]^{5-}$ и его конфигурация иные, чем у групп $[\text{SiO}_4]^{4-}$, характер химических связей также отличен. Поэтому имеется предел замещения Si^{4+} на Al^{3+} .

За счет избыточного заряда пакетов между ними в структуру встраивается слой катионов-компенсаторов. Это могут быть ионы калия, магния. В слоистых алюмосиликатах (мусковита и биотита) роль катиона-компенсатора играет ион калия K^+ . Это двуоктаэдрическая слюда. Калий имеет координационное число 12, он плотно упакован между ионами кислорода, так как имеет равный с ним ионный радиус (по Гольдшмидту радиус иона калия равен $R_{\text{K}^+} = 0.133$ нм, а радиус иона кислорода $R_{\text{O}^{2-}} = 0.132$ нм; отношение $R_{\text{K}^+}/R_{\text{O}^{2-}} = 1$, что идеально отвечает координационному числу 12).

По данным ДТА [8, 9] у мусковита в температурном интервале 750–850°C происходит выделение конституционной воды, а при температурах

1020–1090°C – разрушение кристаллической решетки.

Реакции дегидратации мусковита с образованием оксидов и синтеза некоторых клинкерных минералов $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ составлены без добавки и с введением углещелочного компонента:



Уравнения зависимости энергии Гиббса от температуры $\Delta G_T^\circ = f(T)$ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta G_T^\circ = & 1106038.91 - 70.74 \ln T - \\ & - 42.0 \times 10^{-3} T^2 + 76.83 \times 10^5 T^{-1} - 403.76 T, \end{aligned} \quad (3-1)$$

Таблица 3. Величина ΔG_T° для уравнений реакций (3-1)–(3-6) с участием мусковита

Реакция	ΔG_T° , кДж/моль					
	600 K	800 K	900 K	1000 K	1200 K	1400 K
1	589.83	387.72	284.24	163.78	–34.41	–253.08
2	392.68	192.96	88.44	–18.99	–239.57	–486.63
3	482.57	310.68	221.94	131.35	–53.56	–244.15
4	1139.52	534.92	232.23	–70.77	–679.08	–1289.98
5	923.34	304.11	–7.87	–321.34	–952.73	–1589.89
6	977.06	369.41	64.85	–240.25	–853.08	–1469.08

$$\Delta G_T^\circ = 865100 - 130.47T \ln T - 59.35 \times 10^{-3} T^2 + 36.23 \times 10^5 T^{-1} + 73.18T, \quad (3-2)$$

$$\Delta G_T^\circ = 900524.84 - 81.89T \ln T - 44.67 \times 10^{-3} T^2 + 72.8 \times 10^5 T^{-1} - 165.92T, \quad (3-3)$$

$$\Delta G_T^\circ = 298214341 + 62.79T \ln T - 53.45 \times 10^{-3} T^2 - 42.04 \times 10^5 T^{-1} - 3429.14T, \quad (3-4)$$

$$\Delta G_T^\circ = 2762025.76 + 3.06T \ln T - 70.8 \times 10^{-3} T^2 - 44.23 \times 10^5 T^{-1} - 3029.29T, \quad (3-5)$$

$$\Delta G_T^\circ = 2820311.46 + 51.64T \ln T - 56.12 \times 10^{-3} T^2 - 43.02 \times 10^5 T^{-1} - 3356.96T. \quad (3-6)$$

Результаты термодинамических расчетов (табл. 3) свидетельствуют о том, что температура начала процесса дегидратации и разрушения структуры кристалла с образованием оксидов (реакция (3-1)) соответствует 1165 K (892°C), что практически совпадает с температурой начала декарбонизации CaCO_3 ($\Delta G_T^\circ = 0$ при $T = 1160$ K [3]). Разрушение структуры слоистых алюмосиликатов при термическом воздействии, появление активных продуктов разложения и одновременное образование оксида кальция способствует протеканию твердофазовых экзотермических реакций при относительно низких температурах 900–1150°C, появлению алюминатов кальция и α' - и β -модификации $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [8]. Расчеты ΔG_T° для реакции (3-4) свидетельствуют о температуре начала образования клинкерных минералов, равной 975 K. Использование углещелочной добавки значительно интенсифицирует процессы дегидратации и образования $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (температура дегидратации снижается на 23°C, а синтез на 54°C) (табл. 3).

Иллит – минерал из группы гидрослюд структурного типа листовые силикаты. В большинстве случаев иллит – продукт частичного гидролиза

мусковита [4]. Химический состав непостоянен, содержание K_2O по сравнению с мусковитом падает до 6 и даже до 2–3%; H_2O , наоборот, возрастает до 8–9%; содержание SiO_2 в иллите часто достигает 50–55%, Al_2O_3 – ниже 25–33%. Примеси: Fe_2O_3 , MgO (до нескольких процентов), CaO и др.

Кристаллическая структура мало чем отличается от структуры мусковита и представляет собой несколько разрыхленную укладку слюдяных пакетов с недостатком катионов как в межслоевом промежутке, так и в гиббситовом октаэдрическом слое. Межслоевое пространство, частично освобождённое от катионов, занимают молекулы воды или ионы гидроксония H_3O^+ .

На термограммах иллита наблюдаются три эндотермических эффекта (–)135, (–)575 и (–)870°C, что соответствует удалению адсорбированной воды [5, 8]. Несмотря на схожесть в строении иллита с мусковитом, процессы, протекающие при термическом воздействии, протекают в различных температурных интервалах. Реакции дегидратации и взаимодействия продуктов разложения с CaO , образовавшегося при декарбонизации CaCO_3 , без и в присутствии углещелочного компонента приведены ниже:

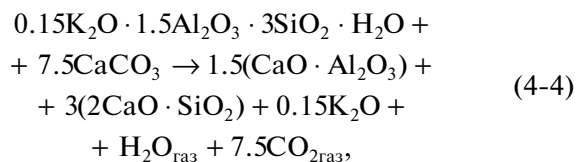
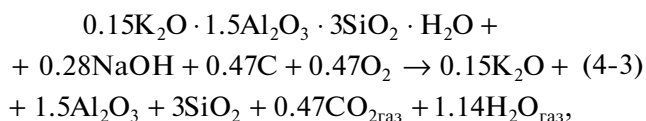
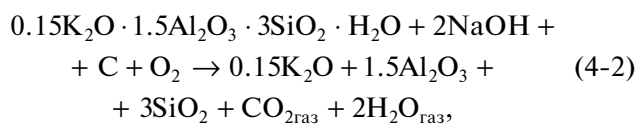
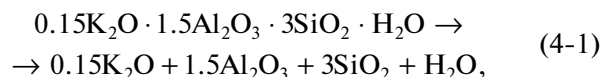
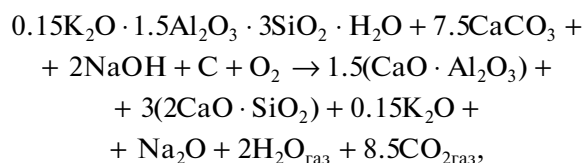


Таблица 4. Величина ΔG_T° для уравнений реакций (4-1)–(4-6) с участием иллита

Реакция	ΔG_T° , кДж/моль					
	600 K	800 K	900 K	1000 K	1200 K	1400 K
1	104.43	68.92	–0.76	–34.91	–102.52	–169.04
2	–4.94	–54.57	–80.64	–107.46	–162.54	–219.72
3	47.49	8.70	–10.47	–29.42	–66.98	–75.99
4	356.54	229.46	165.20	100.55	–29.39	–160.18
5	226.68	134.53	89.69	45.67	–40.90	–125.13
6	262.47	158.53	106.19	53.68	–51.61	–157.21

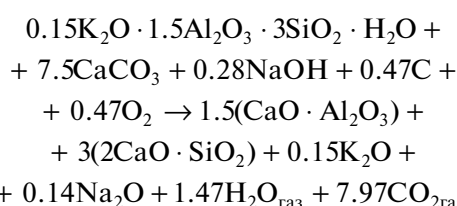
Таблица 5. Температура [K], при которой величина $\Delta G_T^\circ = 0$ для уравнений реакций с участием глинистых минералов

Реакция	Глинистый минерал			
	каолинит	монтмориллонит	мусковит	иллит
1	~1304	~1080	~1165	~899
2	—	~695	~983	~583
3	~985	~760	~1142	~843
4	~824	~842	~975	~1158
5	—	~682	~898	~1015
6	~722	~822	~921	~1105



(4-5)

$$\Delta G_T^\circ = 735568.11 - 17.32T \ln T - 2.09 \times 10^{-3}T^2 - 35.78 \times 10^5 T^{-1} - 509.67T, \quad (4-4)$$



(4-6)

$$\Delta G_T^\circ = 548751.31 + 42.41T \ln T + 15.26 \times 10^{-3}T^2 - 33.59 \times 10^5 T^{-1} - 808.04T, \quad (4-5)$$

$$\Delta G_T^\circ = 580557.93 - 6.17T \ln T + 0.58 \times 10^{-3}T^2 - 34.80 \times 10^5 T^{-1} - 481.34T. \quad (4-6)$$

Полученные в результате интегрирования уравнения теплоемкости зависимость ΔG_T° от температуры для реакций, представленных с участием иллита, имеют следующий вид:

$$\Delta G_T^\circ = 336899.84 + 25.69T \ln T + 4.33 \times 10^{-3}T^2 - 4.51 \times 10^5 T^{-1} - 553.21T, \quad (4-1)$$

$$\Delta G_T^\circ = 116782.64 - 34.04T \ln T - 13.02 \times 10^{-3}T^2 - 6.7 \times 10^5 T^{-1} + 24.66T, \quad (4-2)$$

$$\Delta G_T^\circ = 177317.79 + 14.75T \ln T + 1.66 \times 10^{-3}T^2 - 5.49 \times 10^5 T^{-1} - 289.77T, \quad (4-3)$$

По термодинамическим расчетам ΔG_T° реакция разложения иллита с образованием оксидов протекает начиная с температуры ~899 К (626°C) (табл. 4), что значительно ниже температуры разложения мусковита (табл. 2), а в смеси с CaCO_3 образование $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ начинается с температуры ~1158 К (885°C). Угщелочная добавка на 56°C снижает температуру дегидратации и на 53°C синтеза клинкерных минералов, образующихся в результате твердофазной реакции.

Значение температуры, при которой величина $\Delta G_T^\circ = 0$, для всех представленных выше уравнений реакций с участием глинистых минералов (табл. 5) свидетельствует о начале процесса дегидратации и синтеза клинкерных минералов, а также о влиянии ввода угщелочного реагента.

Каолинит и монтмориллонит содержатся в глинах, широко используемых при производстве

керамических материалов; они теряют химически связанную воду при более низких температурах, чем мусковит и иллит. Углекислотная добавка, используемая в качестве поверхностно-активного вещества, интенсифицирует процесс дегидратации глинистых минералов (табл. 4).

При производстве портландцементного клинкера преимущественно используются глины иллитового состава, температура начала образования оксидов при обжиге равна 899 К, а синтеза клинкерных минералов 1158 К. У мусковита температура разрушения кристаллической решетки близка к 1165 К, что выше, чем у иллита. Но в смеси с CaCO_3 температура начала образования клинкерных минералов ниже, чем с иллитом, что объясняется близостью температур разложения и декарбонизации CaCO_3 с образованием активных продуктов, взаимодействующих друг с другом в твердом состоянии. Добавка углекислотного состава интенсифицирует эти процессы, и температура начала образования минералов на 40–50°C смещается в область более низких температур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных термодинамических расчетов процесса дегидратации глинистых минералов с образованием оксидов и синтеза $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (табл. 4) позволяет оценить эффективность использования при производстве портландцементного клинкера глин преимущественно гидрослюдистого состава (например, иллит). Содержание в глинах мусковита смещает температуру синтеза клинкерных минералов в область более низких температур. Введение в состав исходной сырьевой смеси углекислотной добавки в оптимальном количестве не только обеспечивает улучшение реологических свойств шлама, но и позволит интенсифицировать физико-химические процессы синтеза клинкера. Смещение процессов в область более низких температур позво-

ляет предположить об экономии топливно-энергетических ресурсов в цементном производстве.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

ΔG_T°	изменение энергии Гиббса реакции
T	температура, К

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Класен В.К.* Технология и оптимизация производства цемента. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2012.
2. *Bushueva N.P., Panova O.A., Besedin P.V.* Intensification of synthesis processes of clinker minerals in presence of coal-alkaline additive // *Advances in Engineering Research*. V. 133. Proceedings of the International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering" 2017 (AIME 2017) (Tomsk, 2017). Paris: Atlantis, 2017. P. 579.
3. *Бабушкин В.И., Матвеев Г.М., Мчедлов-Петросян О.П.* Термодинамика силикатов. М.: Стройиздат, 1986.
4. *Годовиков А.Я.* Минералогия. М.: Недра, 1983.
5. *Штрюбель Г., Циммер З.* Минералогический словарь. Пер. с нем. М.: Недра, 1987.
6. *Cheng H., Yang J., Liu Q., He J., Frost R.L.* Thermogravimetric analysis—mass spectrometry (TG—MS) of selected Chinese kaolinites // *Thermochim. Acta*. 2010. V. 507—508. P. 106.
7. *Бушueva Н.П., Панова О.А.* Энергетические аспекты воздействия углекислотной добавки на дегидратацию глинистых минералов // *Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. № 8. С. 180.
8. *Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г.* Методы физико-химического анализа вяжущих веществ: учебное пособие. М.: Высш. школа, 1981.
9. *Бушueva Н.П., Панова О.А.* Исследование структуры и морфологических превращений слоистых алюмосиликатов при термическом воздействии // *Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. № 6. С. 183.