

УДК 536.7:662.74

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗЛОЖЕНИЯ РАНКИНИТА (ОБЗОР)

В.С. Энгельшт, В.Ж. Мураталиева

Дан обзор ряда объединенных общей темой явлений – нагрев, разложение ранкинита, волластонита, извести, плавление извести. Развита метод сквозного термодинамического анализа путем мелкошаговой процедуры расчета по энтальпии. Определены состав компонентов разложения, температуры разложения и плавления, энергии разложения и плавления. Показано, что разложение идет поэтапно.

Ключевые слова: ранкинит; волластонит; известь; нагрев; разложение; плавление; термодинамический анализ; энтальпия; температура; теплосодержание.

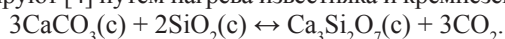
Введение. Пиросиликат $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2(\text{c})$ – это редкий минерал ранкинит. Он плавится при температуре 1737 К инконгруэнтно с образованием двухкальциевого силиката и жидкости [1]:

$$1737 \text{ К}$$

$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2(\text{c}) \leftrightarrow 2\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2(\text{c}) + \text{Расплав}, (*)$
где (с) – конденсированное состояние.

По данным [2] ранкинит – кристаллический минерал. Пиросиликат $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7(\text{c})$ получают обжигом смеси $\text{CaO}(\text{c})$ и $\text{SiO}_2(\text{c})$ в стехиометрических количествах.

Ранкинит – промежуточный продукт в производстве порландцементного клинкера [3], который синтезируют [4] путем нагрева известняка и кремнезема:



Ранкинит предлагается использовать в качестве фильтра для удаления углекислого газа в соответствии с предыдущей обратной реакцией [4].

Цель данного исследования заключается в термодинамическом анализе явлений нагрева, разложения ранкинита, волластонита, извести, плавления извести. Определены состав компонентов разложения, температуры разложения и плавления, энергии разложения и плавления. Выявлены этапы разложения.

Метод исследования. Расчет адиабатической температуры и продуктов реакции проводился по универсальной программе TERRA [5].

Изучается следующий состав: 100 % $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7(\text{c})$.

Задаем температуру $T = 298,15 \text{ К}$, находим энтальпию образования ранкинита $I_0 = -13734 \text{ кДж/кг}$, давление – $p = 0,095 \text{ МПа}$. Исходный состав нормируется в программе TERRA на массу 1 кг и имеет компоненту $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7(\text{c})_{\text{исх}} = 3,46731 \text{ моль/кг}$. Входим в программу TERRA, получаем компоненты, теплосодержание, температуру. Последовательно, пошагово увеличиваем энтальпию. Вводим обозначения $\Delta I = I - I_0$ – приращение энтальпии, ΔH – теплосодержание.

Пример расчета компонентов разложения ранкинита, теплосодержания, температуры, приращения энтальпии, теплоты химической реакции и результаты анализа приведены в таблице 1 и нижеследующем тексте. Задана энтальпия $I = -11034 \text{ кДж/кг}$ в диапазоне разложения ранкинита.

Здесь $\Delta h_{2598,36}$ – теплосодержание вещества при температуре $T = 2598,36 \text{ К}$, кДж/моль ; Δh^0 – энтальпия образования вещества при стандартных условиях, кДж/моль ; Q_{xp} – теплота химической реакции,

Таблица 1 – Продукты реакции и результаты анализа:
 $I = -11034 \text{ кДж/кг}$, $p = 0,095 \text{ МПа}$, $DI = 2700 \text{ кДж/кг}$, $T = 2598,36 \text{ К}$

Вещество	M , моль/кг	$\Delta h_{2598,36}$, кДж/моль	$\Delta H = M \times \Delta h_{2598,36}$, кДж/кг	Δh^0 , кДж/моль	$\Delta H^0 = M \times \Delta h^0$, кДж/кг	Q_{xp} , кДж/кг
$\text{CaO}(\text{c})$	1,03939	124,6298	129,53	-635,091	-660,107	58,3
$\text{CaSiO}_3(\text{c})$	2,07878	367,5758	764,11	-1634,94	-3398,68	
$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7(\text{c})$	2,42792	720,0136	1748,14	-3961,003	-9617	
Σ	-	-	2641,78	-	-13675,79	

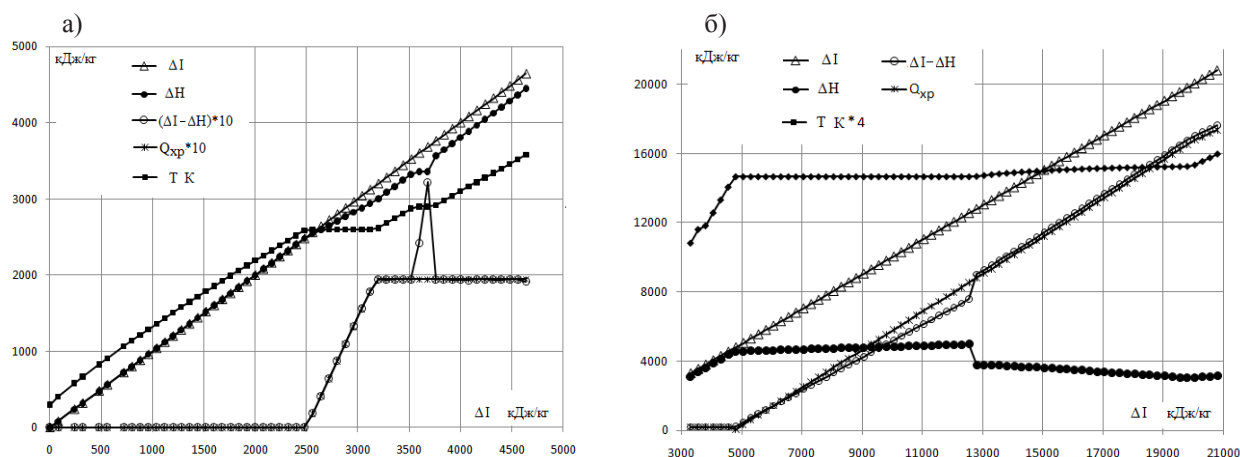


Рисунок 1 – Эволюция нагрева и разложения ранкинита: а) $\Delta I = 0 - 5000$ кДж/кг; б) $\Delta I = 3000 - 21000$ кДж/кг

кДж/моль; $\Delta_f H^0$, ΔH – соответствующие величины с учетом мольной доли вещества, кДж/моль.

Вычисляем энтальпию продуктов реакции:

$$I_{\text{прод}} = M_{\text{CaO}(c)} \times \Delta_f h^0_{\text{CaO}(c)} + M_{\text{CaSiO}_3(c)} \times \Delta_f h^0_{\text{CaSiO}_3(c)} + M_{\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7(c)} \times \Delta_f h^0_{\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7(c)}$$

$$I_{\text{прод}} = 1,03939 \times [-635,091] + 2,07878 \times [-1634,94] + 2,42792 \times [-3961,003] = -13675,79 \text{ кДж/кг.}$$

Найдем теплоту химической реакции [6]:

$$Q_{xp} = 1,03939 \Delta_f h^0_{\text{CaO}(c)} + 2,07878 \Delta_f h^0_{\text{CaSiO}_3(c)} + 2,42792 \Delta_f h^0_{\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7(c)} - 3,46731 \Delta_f h^0_{\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7(c)} = 58,24 \text{ кДж/кг.}$$

Теплосодержание системы вычисляется по вспомогательной программе TERRA (см. таблицу 1) $\Delta H = M \times \Delta h_{2598} = 2641,78$ кДж/кг.

Расчет по программе TERRA выполняется согласно равенству $\Delta H + \Delta_f H^0 = I$.

Энтальпийный фактор разложения ранкинита. Энтальпийный фактор – приращение энтальпии ΔI – это причина, определяющая эволюцию нагрева и разложения ранкинита. Приращение энтальпии ΔI приводит к возрастанию теплосодержания, температуры, теплоты преобразования.

На рисунке 1 показаны основные результаты расчета компонентов энергии и температура.

Величина ΔI по условию задания монотонно возрастает. На отрезке энтальпии от $\Delta I = 0$ до $\Delta I = 2500$ кДж/кг величина теплосодержания совпадает с приращением энтальпии. Вся приращенная энтальпия переходит в нагрев, температура синхронно возрастает с энтальпией.

Расчет по программе TERRA не выявил процесса плавления ранкинита, тогда как по данным [1] температура плавления ранкинита $T = 1737$ К. Здесь в диапазоне $\Delta I = 0 \div 2500$ кДж/кг ($T = 300 \div 2500$ К), всюду $\Delta I - \Delta H = 0$.

Разложение ранкинита происходит при изменении энтальпии $\Delta I = 2500 \div 3200$ кДж/кг (рисунок 1а). В процессе его разложения увеличивается теплота химической реакции и энергия преобразования. При завершении процесса $\Delta I - \Delta H = Q_{xp} = 194$ кДж/кг. Теплосодержание ΔH возрастает, температура сохраняется неизменной, $T = 2598,36$ К.

При дальнейшем увеличении энтальпии $\Delta I = 3552 \div 3732$ кДж/кг происходит плавление извести $\text{CaO}(c)$, что отражается на форме кривой $\Delta I - \Delta H$. По окончании плавления $Q_{\text{пл}} = (\Delta I - \Delta H) - Q_{xp} = 180$ кДж/кг. В процессе плавления теплосодержание остается практически неизменным, температура сохраняется постоянной, $T = 2899 \div 2901$ К.

При увеличении $\Delta I > 4500$ кДж/кг (рисунок 1б) происходит разложение волластонита с выделением $\text{CaO}(c)$ и газовых компонентов. Температура постоянна, $T = 3662,7$ К, теплосодержание практически не изменяется. Процесс разложения волластонита заканчивается при $\Delta I = 12553$ кДж/кг. Энергия преобразования $-Q = (\Delta I - \Delta H) = Q_{xp} \approx 9000$ кДж/кг.

При $\Delta I = 12803$ кДж/кг происходит разложение извести на атомарный кальций (Ca) и кислород (O). При этом температура ($T = 3668 - 3834$ К) и теплосодержание почти постоянны. Энергия преобразования $Q = (\Delta I - \Delta H) = Q_{xp} \approx 17000$ кДж/кг.

Компоненты разложения. С увеличением энтальпии последовательно идут процессы нагрева, разложения ранкинита, плавления извести, разложения волластонита, разложения извести. Компоненты разложения при эволюции энтальпии показаны на рисунке 2.

На рисунке 2 указаны температура (T) и компоненты разложения ранкинита: $\text{CaSiO}_2(c)$, $\text{CaO}(c)$, CaO , SiO , O , O_2 .

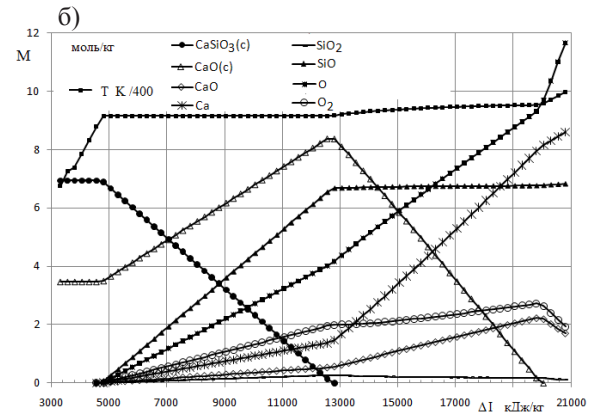
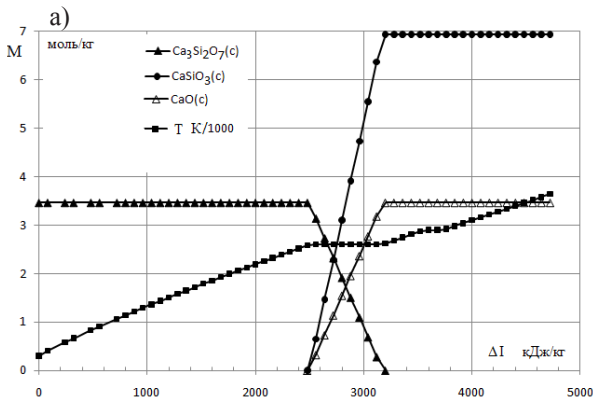


Рисунок 2 – Компоненты разложения: а) ранкинита; б) волластонита и извести; Т – температура

При $\Delta I = 2500$ кДж/кг происходит разложение ранкинита с образованием жидкого волластонита и твердой извести, при постоянной температуре $T = 2598,36$ К. Происходит инконгруэнтное плавление – плавление с разложением, при котором твердая фаза преобразуется в расплав и твердую фазу. Согласно [3] температура плавления волластонита $T = 1817$ К, температура плавления извести $T = 2903$ К. Продуктом разложения является суспензия из жидкого волластонита и твердой извести.

Реакция разложения ранкинита записывается следующим образом:



где (ж) – жидкая фаза, (т) – твердая фаза.

Этот результат принципиально отличается от известного в литературе [1] (*).

Отметим дополнительно, что в программе TERRA не выявилось плавление ранкинита в диапазоне $\Delta I = 0 \div 2500$ кДж/кг ($T = 298,15 \div 2500$ К). Инконгруэнтное плавление ранкинита наблюдается здесь при $T = 2598,36$ К вместо указанной в литературе $T = 1737$ К [1].

При изменении энтальпии $\Delta I = 4803 \div 12553$ кДж/кг происходит разложение волластонита $\text{CaSiO}_3(c) \sim \text{CaO}(c) + \text{CaO} + \text{Ca} + \text{SiO}_2 + \text{SiO} + \text{O} + \text{O}_2$ (рисунок 2б). Температура ($T = 3663 \div 3668$ К) и теплосодержание примерно постоянны.

Вслед за разложением волластонита $\Delta I = 12803 \div 20053$ кДж/кг идет разложение извести $\text{CaO}(c) \sim \text{CaO} + \text{Ca} + \text{O} + \text{O}_2$. Температура разложения извести ($T = 3668 - 3834$ К) и теплосодержание примерно постоянны.

Детализация разложения и плавления. Детализация процессов разложения и плавления представлена путем сквозного мелкошагового расчета термодинамических параметров. Последовательно обсуждается разложение ранкинита на трех этапах.

На рисунках 3–7 показаны компоненты энергии и вещества.

Использовался шаг по энтальпии $\delta(\Delta I) = 10$ кДж/кг, что соответствует эффективному шагу разложения ранкинита по температуре

$$\delta(\Delta T) = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{N} = \frac{2610 - 2598,36}{34} = 0,3\text{K},$$

где N – количество шагов расчета.

Детали разложения ранкинита. Диапазон разложения ранкинита составляет $\Delta I = 2500 \div 3180$ кДж/кг (рисунок 3а).

Приращение энтальпии по условию монотонно возрастает, теплосодержание ΔH также возрастает, но медленнее. При изотермическом процессе разложения температура сохраняется ($T = 2598,36$ К). Температура сохраняется постоянной в связи с конкуренцией приращения теплосодержания и затрат энергии на химическую реакцию.

На рисунке 3б указаны компоненты теплосодержания, доли разлагающегося ранкинита и образующихся волластонита и извести. Их сумма равна

$$\Delta H = \Delta H_{\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7(c)} + \Delta H_{\text{CaSiO}_3(c)} + \Delta H_{\text{CaO}(c)}.$$

Результат необычен, происходит неполная компенсация теплосодержания образующихся и разлагающихся компонентов, иначе было бы $\Delta H = \text{const}$, т. е. постоянная величина, которая имела бы место, например, при плавлении.

Теплота химической реакции разложения определяется из условия $Q_{\text{xp}} = \Delta I - \Delta H$ (см. рисунок 3в). Как видно, разложение линейно возрастает с энтальпией. Максимальная величина теплоты разложения соответствует разности $Q_{\text{xp}} = \Delta I - \Delta H = 194,3$ кДж/кг. Мольная доля ранкинита в системе составляет $M = 3,46731$ моль/кг, отсюда получаем тепловой эффект разложения ранкинита $Q_{\text{xp,уд}} = Q_{\text{xp}}/M = 56$ кДж/кг. Это новый результат, не представленный в справочниках.

В диапазоне разложения ранкинита $\Delta I = 2500 - 3180$ кДж/кг происходит приращение энтальпии

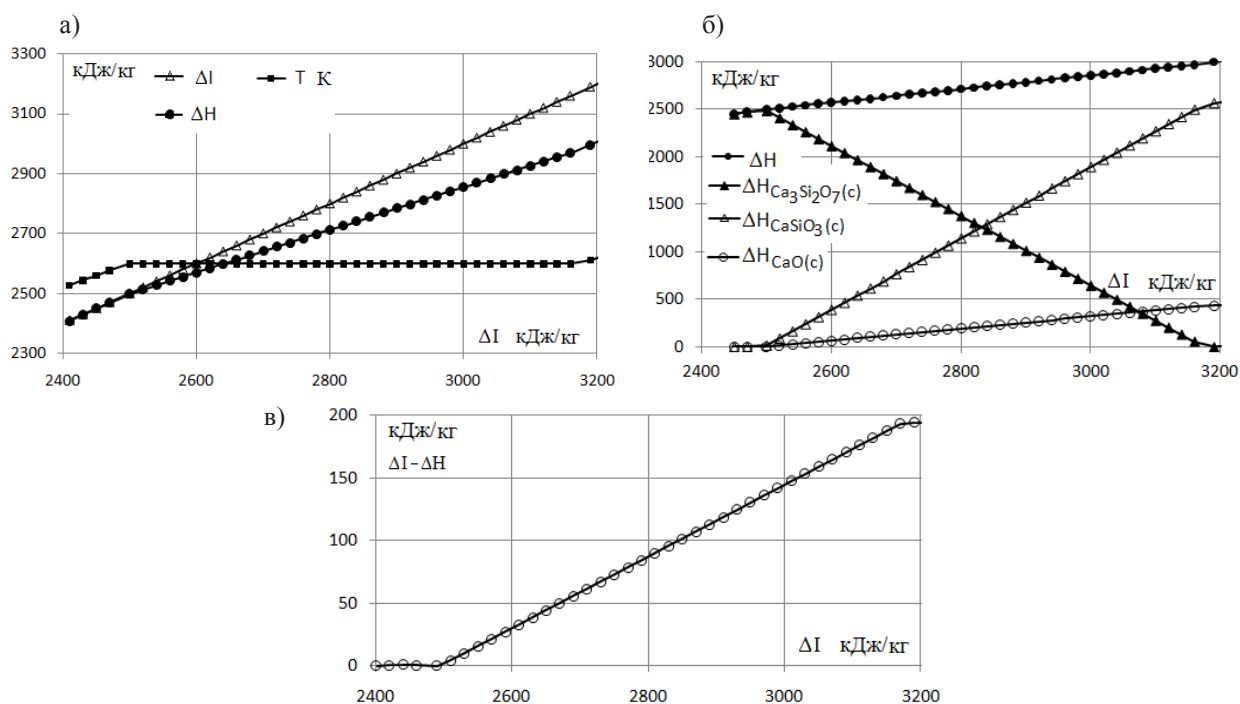


Рисунок 3 – Детали разложения ранкинита: а) компоненты энергии; б) компоненты теплосодержания; в) теплота разложения

$\delta(\Delta I) = 680$ кДж/кг. Таким образом, химическая реакция $Q_{xp} = 194$ кДж/кг составляет $Q_{xp}/\delta(\Delta I) = 28\%$ от затрат на разложение ранкинита.

Полная затрата энергии на нагрев и разложение ранкинита равна $\Delta I = 3180$ кДж/кг, что составляет $Q_{xp}/\Delta I = 6\%$ от теплоты химической реакции $Q_{xp} = 194,3$ кДж/кг. КПД физического тепла $\Delta H/\Delta I = 94\%$.

Продуктами разложения конденсированного ранкинита являются конденсированные компоненты волластонит и известь. Разложение идет без выделения газовых компонентов. Отсюда следует, что при обеспечении теплосъема можно провести обратную реакцию $3CaO(c) + 2SiO_2(c) = Ca_3Si_2O_7(c)$, путем соединения их осколков и залечивания изделия. При разложении ранкинита ($T = 2600$ К) образуется суспензия, которую можно использовать в качестве расплава для нанесения покрытий. Например, при введении прутка ранкинита в плазму двухструйного плазматрона [7]. Образующийся при расплавлении волластонит с твердой известью, а также восстановление ранкинита при остывании может обеспечить прочностные и долговечные свойства керамическим облицовкам по аналогии с тем, что такими свойствами обладают волластонит и анортит [8].

Осколки волластонита и извести после разложения имеют высокое теплосодержание, поэтому необходимо отвести тепло, чтобы получить ранкинит.

Детали плавления извести. Известь плавится после разложения ранкинита при энтальпии $\Delta I = 3552 \div 3732$ кДж/кг при температуре $T = 2899 \div 2901$ К. На протяжении плавления теплосодержание сохраняется (рисунок 4а). Теплота плавления $Q_{пл} = (\Delta I - \Delta H) - Q_{xp}$ изменяется линейно с энтальпией (рисунок 4б). По окончании плавления $Q_{пл} = 179,8$ кДж/кг, что дает удельную теплоту плавления $Q_{пл,уд} = 52$ кДж/моль. Сравним с литературными данными $Q_{пл,уд} = 79,61$ кДж/моль [2]. Полученная теплота плавления почти в два раза меньше представленной в [2]. На рисунке 4в в качестве иллюстрации показана распечатка эволюции температуры плавления извести. Отметим здесь также малый диапазон плавления, $\Delta T = 2$ К и мелкий шаг термодинамического анализа $\delta(\Delta T) = \frac{\Delta T}{N} = \frac{2}{46} = 0,04$ К, где N – количество шагов термодинамического расчета.

Выше результат был получен при исходном составе $CaSiO_3(ж) + CaO(т)$, т. е. когда плавление извести наблюдается в жидком волластоните, сопровождаемой химической реакцией. Было интересно определить плавление чистой извести. Для этого заданы: $100\% CaO(c) + 10^{-5} Ag$, $I_0 = -11324,8$ кДж/кг, $p = 0,095$ МПа. Последовательно увеличиваем энтальпию, находим область, где температура остается постоянной. Определяем температуру

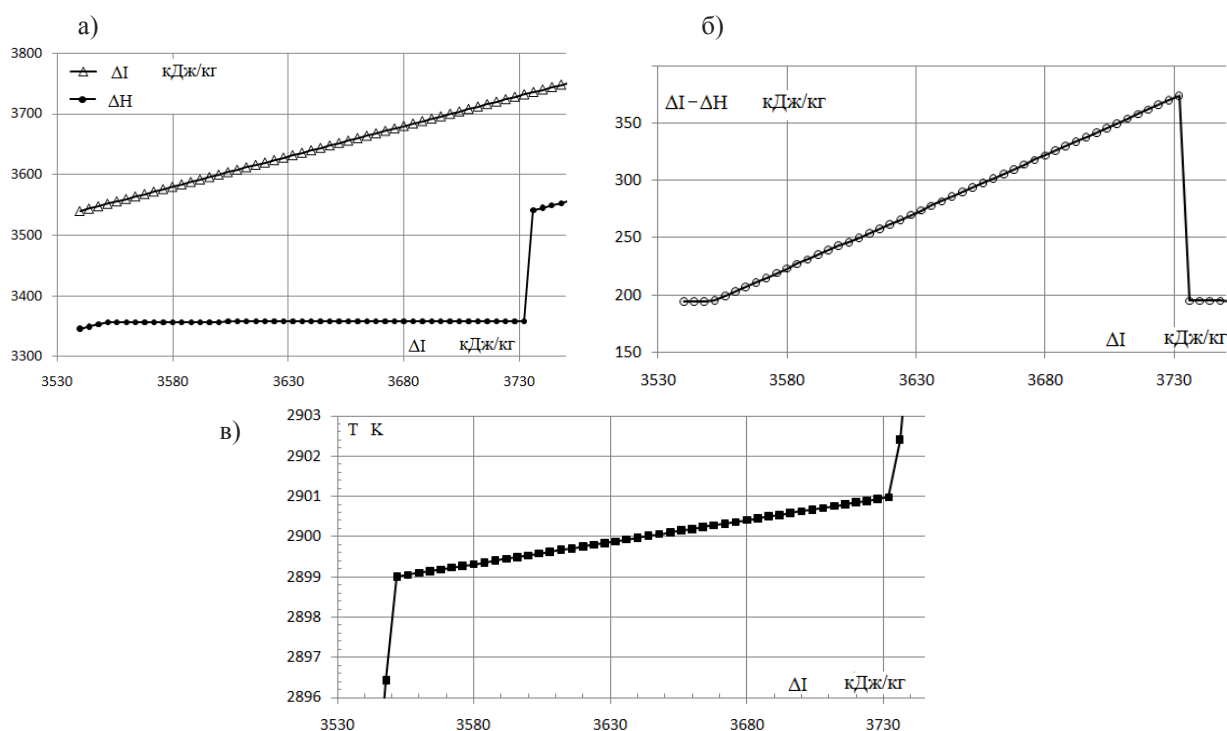


Рисунок 4 – Детали плавления извести: а) компоненты энергии; б) теплота плавления; в) температура плавления

плавления $T_{пл}$. Вычисляем теплосодержание, теплоту плавления $Q_{пл} = \Delta I - \Delta H$. Строим графики зависимости $Q_{пл}$ от ΔI . Находим теплоту плавления $Q_{пл} = (\Delta I - \Delta H)_{max} = 920$ кДж/кг. Определяем приведенную теплоту плавления $Q_{пл,уд} = \frac{Q_{пл}}{M} = \frac{920 \text{ кДж/кг}}{17.8 \text{ моль/кг}} = 52$ кДж/кг.

Величина $Q_{пл,уд}$ точно равна полученной нами из программы TERRA $Q_{пл,уд} = 52$ кДж/моль, но сильно отличается от известной из литературы $Q_{пл,уд} = 79,61$ кДж/моль. Жидкий волластонит не влияет на плавление извести.

На рисунке 5 показана эволюция температуры и теплоты плавления чистой извести в зависимости от ΔI .

Детали разложения волластонита. На рисунке 6 представлены компоненты энергии разложения волластонита.

Диапазон разложения волластонита составляет $\Delta I = 4803 \div 12553$ кДж/кг (рисунок 6а). Приращение энтальпии по условию монотонно возрастает, температура постоянна $T = 3662,7$ К, теплосодержание $\Delta H \approx 4980$ кДж/кг сохраняется почти постоянными. Теплота химической реакции монотонно возрастает, достигая величины $Q_{xp} = \Delta I - \Delta H = 8737$ кДж/кг. Мольная доля волластонита $M = 6,93462$ моль/кг. Отсюда приведенная теплота разложения волластонита $Q_{xp,уд} = \frac{Q_{уд}}{M} =$

$1259,9$ кДж/кг. Это новый результат, ранее не представленный в справочниках.

На рисунке 6б приведена оценка экзотермического эффекта, наблюдаемого при разложении ранкинита. Баланс энергии $\Delta I = \Delta H + Q_{xp} + Q_{экзо}$, отсюда $Q_{экзо} = (\Delta I - \Delta H) - Q_{xp}$ – теплота при экзотермическом эффекте. Максимальная величина $Q_{экзо} = -1162,1$ кДж/кг, или $Q_{экзо,уд} = \frac{Q_{экзо}}{M} = 167,6$ кДж/кг, что составляет $Q_{экзо} / Q_{xp} = 13$ % от теплоты химической реакции разложения. Или от полной затраченной энергии $\Delta I = 12553$ кДж/кг составляет $Q_{экзо} / \Delta I = 9$ %. Полная затрата энергии на разложение волластонита от теплоты химической реакции составляет $\frac{Q_{xp} - Q_{экзо}}{\Delta I} = 60$ % КПД физического тепла – $\Delta H / \Delta I = 40$ %.

Детали разложения извести. После разложения волластонита происходит разложение извести с образованием газовых компонентов, $\Delta I = 12803 \div 20053$ кДж/кг. На рисунке 7 представлены детали разложения извести. Температура разложения извести $T = 3668 \div 3834$ К, диапазон температуры разложения составляет $\Delta T = 166$ К. Теплосодержание практически постоянно.

Теплота химической реакции $Q_{xp} = (\Delta I - \Delta H) = 16970$ кДж/кг, или в мольных долях ($M_{CaO} = 8,36079$ моль/кг) $Q_{xp,уд} = \frac{Q_{xp}}{M} = 2029,7$ кДж/кг.

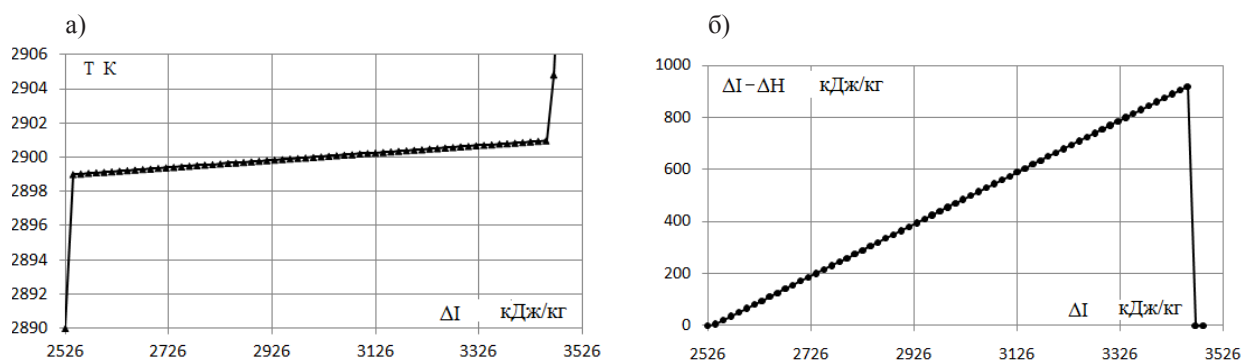


Рисунок 5 – Температура (а) и теплота плавления (б) чистой извести

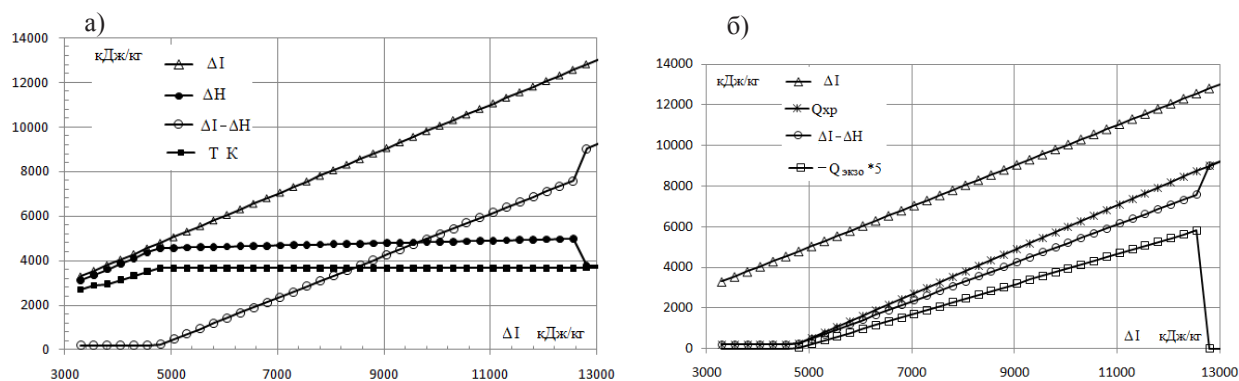


Рисунок 6 – Детали разложения волластонита: а) теплота химической реакции; б) экзотермический эффект

Затраты на разложение составляет $Q_{xp} / \Delta I = 85 \%$. Физическое тепло $\Delta H / \Delta I = 15 \%$.

Выводы. В таблице 2 приведены основные параметры разложения и плавления. Здесь указаны диапазоны энтальпии и температуры этапов разложения ранкинита, плавления извести, разложения волластонита, разложения извести.

Указанные процессы происходят последовательно с увеличением энтальпии и температуры.

- Температурные диапазоны ΔT разложения и плавления малы.
- Диапазон теплосодержания ΔH также мал, за исключением разложения ранкинита, где теплосодержание возрастает с увеличением энтальпии.
- Теплота химической реакции Q_{xp} минимальна при разложении ранкинита и возрастает к волластониту и извести.
- Определена теплота плавления извести, которая примерно в два раза меньше известной из работы [2].
- Затраты на химическую реакцию составляют 6, 60, 85 % на разложение ранкинита, волластонита и извести соответственно, 4,8 % на плавление извести.

Физическое тепло (теплосодержание) составляет 94, 90, 40 и 15 % при переходе от разложения ранкинита, плавления извести, разложения волластонита и разложения извести.

Продемонстрирован мелкошаговый метод термодинамического анализа $\delta(\Delta I)_{\min} = 4$ кДж/кг, $\delta(\Delta T)_{\min} = 0,04$ К.

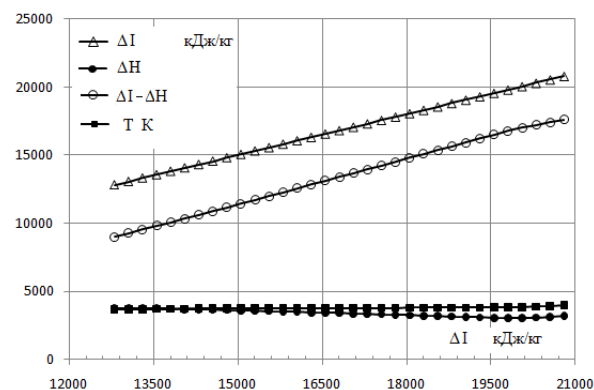
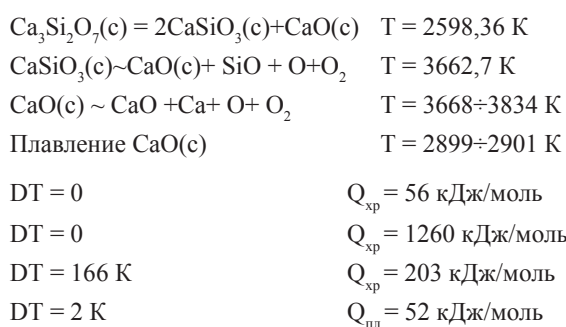


Рисунок 7 – Детали разложения извести

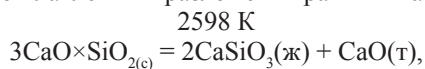
Таблица 2 – Сводная информация

Показатели	Разложение ранкинита	Плавнение извести	Разложение волластонита	Разложение извести
$T_{пл/разл}, K$ $T_{пл}, K$ $T_{пл}, K$	2598,36 1737 [1, 3]	2899 ÷ 2901 2903 [3] 2873 [2]	3662,7	3668 ÷ 3834
$\Delta T, K$	0	2	0	166
$\delta(\Delta T)$	0,3	0,04	0,2	5
$\Delta I, кДж/кг$	2500 ÷ 3180	3552 ÷ 3732	4803 ÷ 12553	12803 ÷ 20053
$\delta(\Delta I)$	10	4	235	235
$\Delta H, кДж/кг$	2490 ÷ 2977	3357 ÷ 3358	4357 ÷ 4979	3788 ÷ 3027
$Q_{хр}, кДж/кг$ $Q_{хр,уд}, кДж/моль$	194,3 56	194,3 56	8737 1260	16970 2030
$Q_{экзо}, кДж/кг$	–	–	-1162	–
$Q_{пл}, кДж/кг$ $Q_{пл,уд}, кДж/моль$ $Q_{пл,уд}, кДж/моль [2]$	–	180 52 79,61	–	–
$Q_{хр}/\Delta I, \%$ $Q_{пл}/\Delta I, \%$ $Q_{экзо}/\Delta I, \%$ $(Q_{хр} - Q_{экзо})/\Delta I, \%$	6	5,2 4,8	69 9 60	85
$\Delta H/\Delta I, \%$	94	90	40	15

Таким образом, построена теория (метод закономерности, обобщение) нагрева, разложения ранкинита, волластонита, извести, плавления извести. Развита метод сквозного термодинамического анализа путем мелкошаговой процедуры расчета по энтальпии. Определены состав компонентов разложения, температуры разложения и плавления, энергии разложения и плавления. Показано, что разложение идет поэтапно:



Выявлены механизм и температура инконгруэнтного плавления – разложения ранкинита:



которые принципиально отличаются от представленных в работе [1] (*)

Необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования.

Литература

1. Кузнецова Т.В. Физическая химия вяжущих материалов: учебник / Т.В. Кузнецова, И.В. Кудряшов, В.В. Тимашев. М.: Высшая школа, 1989. 384 с.
2. Бабушкин В.И. Термодинамика силикатов / В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев, О.П. Мчедлов-Петросян; под ред. О.П. Мчедлова-Петросяна. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1986. 408 с.
3. Химический энциклопедический словарь / гл. ред. И.Л. Кнунянц. М.: Сов. энциклопедия, 1983. 588 с.
4. Minghua Wang, Chao Li, Yuchun Zhai. Sorption-Desorption Behavior of CO₂ on Ca₃Si₂O₇ // 2010. The Second China Energy Scientist Forum. Scientific Research. P. 315–319.
5. Трусов Б.Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий в плазмохимических системах / Б.Г. Трусов // 3-й междунар. симп. по теорет. и прикл. плазмохимии: сб. материалов. Т. I. Иваново, 2002. С. 217–220.
6. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справ. изд-е: Т. 1, Кн 1 / Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев и др. М.: Наука, 1978–1982.
7. Жеенбаев Ж.Ж. Двухструйный плазматрон / Ж.Ж. Жеенбаев, В.С. Энгельшт. Фрунзе: Илим, 1983. 202 с.
8. Абдрахимов В.З. Влияние фазового состава на долговечность керамической облицовки самаркандского ансамбля Шахи-Зинда / В.З. Абдрахимов // Стекло и керамика. 2012. № 3. С. 38–40.