

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-3-97-106

¹Бессмертный В.С., ^{1,*}Бондаренко М.А., ¹Пучка О.В., ¹Черкасов А.В., ¹Изотова И.А.,
¹Брагина В.С., ²Платов Ю.Т., ³Брагина Л.Л.

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

²Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова

³Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

*E-mail: bond.marinka@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГИДРАТАЦИИ КОЛЕМАНИТА В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Исследованы закономерности дегидратации колеманита в неизотермических условиях. Установлено, что колеманит, поставляемый в РФ из Турции, имеет в своем составе кальцит. С использованием рентгенофлуоресцентного метода анализа установлен химический состав колеманита. Показано, что процессы дегидратации колеманита в неизотермических условиях при скорости нагрева 10 °С/мин сопровождаются двумя эндотермическими эффектами при 660,7 К и 675,7 К с общей потерей массы 17,3 %. Так же исследована скорость потери массы колеманита от температуры при нагреве до 773 К, при которой колеманит дегидратирует и переходит в аморфную фазу. Установлены закономерности изменения скорости дегидратации колеманита. Показано, что максимальные значения скорости дегидратации колеманита наблюдаются в интервале температур 653–678 К. Определена энергия активации дегидратации колеманита, равная 86000 Дж/моль. На основе экспериментально полученных данных рассчитана константа скорости процесса дегидратации колеманита. Процесс дегидратации колеманита удовлетворительно описывается формальным уравнением кинетики. Большая часть кинетической кривой удовлетворительно описывается полученным кинетическим уравнением. Предложено механизм дегидратации колеманита описывать двухстадийным процессом, сопровождающимся на первом этапе удалением кристаллизационной воды, а на втором этапе – удалением гидроксильных групп.

Ключевые слова: колеманит, дегидратация, неизотермические условия, энергия активации, эндотермические эффекты, кинетическое уравнение.

Введение. В настоящее время колеманит находит всё большее применение в технологии стеклокристаллических композиционных материалов [1–3].

Колеманит относится к кальциевым боратам, моноклинной сингонии и представлен химической формулой $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Данный минерал является источником оксида бора.

В силикатной промышленности оксид бора является необходимым компонентом для таких видов стекол, как медицинское, термически и химически устойчивые стекловолокна марок D, C и E, в составе глазурей и эмалей, а также стекло типа пирекс [4].

Установлена эффективность применения колеманита в производстве базальтового стекловолокна [5, 6]. Малощелочное борсодержащее стекло, полученное с использованием колеманита, может быть использовано в производстве декоративно-художественных стекол, стекломрамора, марблита и глушённых стекол [7].

Колеманит используется для получения бетонов специального назначения, однако, многочисленными исследованиями установлено, что колеманит снижает прочность бетона при сжатии и сроки схватывания цемента [8–11].

Важным аспектом практического использования колеманита в стекольных шихтах и стеклокерамических композициях является изучение процессов дегидратации. Одним из наиболее информативных современных методик исследования процессов дегидратации является термогравиметрический [12, 13].

Исследованию фазовых превращений колеманита в неизотермических условиях посвящен ряд работ [14–17].

В работе [18] был исследован колеманит состава (масс. %): B_2O_3 – 50,8; CaO – 27,2; SiO_2 – 0,03; H_2O – 21,8. Твердость колеманита по шкале Мооса составила – 4,5, а плотность – 2,423 г/см³ [19]. Образец был добыт в Турции и был исследован в университете г. Падуя (Италия) [20].

В цитируемых работах условия проведения исследований, в частности скорость нагрева была различна. Полученные значения начала и конца дегидратации колеманита несколько отличаются. Следует также отметить различные значения двух эндотермических эффектов.

Авторы [18] отмечали два эндотермических пика дегидратации колеманита при 645 К и 661 К, полученных при скорости нагрева 2 °С/мин. В работе [15] авторы отмечали наличие

двух эндотермических эффектов при 642 К и 659 К.

В районе 673 К два эндотермических эффекта заканчивались с полной аморфизацией колеманита, а при 1073 К – наблюдались процессы кристаллизации с двумя экзотермическими эффектами [14]. Однако, в работе [16] показано, что процесс дегидратации колеманита проходит за одну стадию при 673,8 К. При исследовании товарного колеманита с небольшими примесями кварца и кальцита было установлено, что процесс дегидратации характеризуется двумя эндотермическими эффектами при 657 К и 672 К. При температуре 1027 К наблюдается кристаллизация соединений CaV_2O_4 и $\text{Ca}_2\text{V}_2\text{O}_5$ [17].

Разноречивые сведения требуют проведения дальнейших исследований в области изучения процессов дегидратации колеманита в неизотермических условиях. Следует также отметить, до настоящего времени не были определены кинетические параметры данного процесса.

Методология. Объектом исследований был выбран колеманит молотый компании «ETIMADEN I.G.M.» турецкой компании на территории РФ ООО «ЭТИПРОДАКТС».

Химический состав колеманита проводили рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре APL 9900 «Thermo scientific» (Швейцария).

Дифференциально-термогравиметрический анализ колеманита проводили на термоанализаторе SETARAM TGA 92-24. Нагрев до 1273 К проводили со скоростью 10 °С/мин в инертной атмосфере с протоком высокочистого аргона ОХЧ с расходом 5л/ч. Начальная масса навески составляла 200 мг.

Энергию активации рассчитывали по данным, полученным по термогравиметрической кривой (ТГ) [21].

Фазовый состав продуктов дегидратации колеманита при различных температурах термообработки определяли методом РФА с использованием дифрактометра ARL XTRA (Швейцария).

Основная часть. На первом этапе был исследован химический состав колеманита (масс. %): V_2O_3 – 40,1; CaO – 27,5; SiO_2 – 5,2; MgO – 2,8; Fe_2O_3 – 0,06; П.П.П. – 24,34.

Результаты исследований процесса дегидратации колеманита в неизотермических исследованиях представлены на термограмме, где отображен ход кривой потери массы в зависимости от температуры (ТГ – кривая) и ДТГ – кривая (рисунок 1).

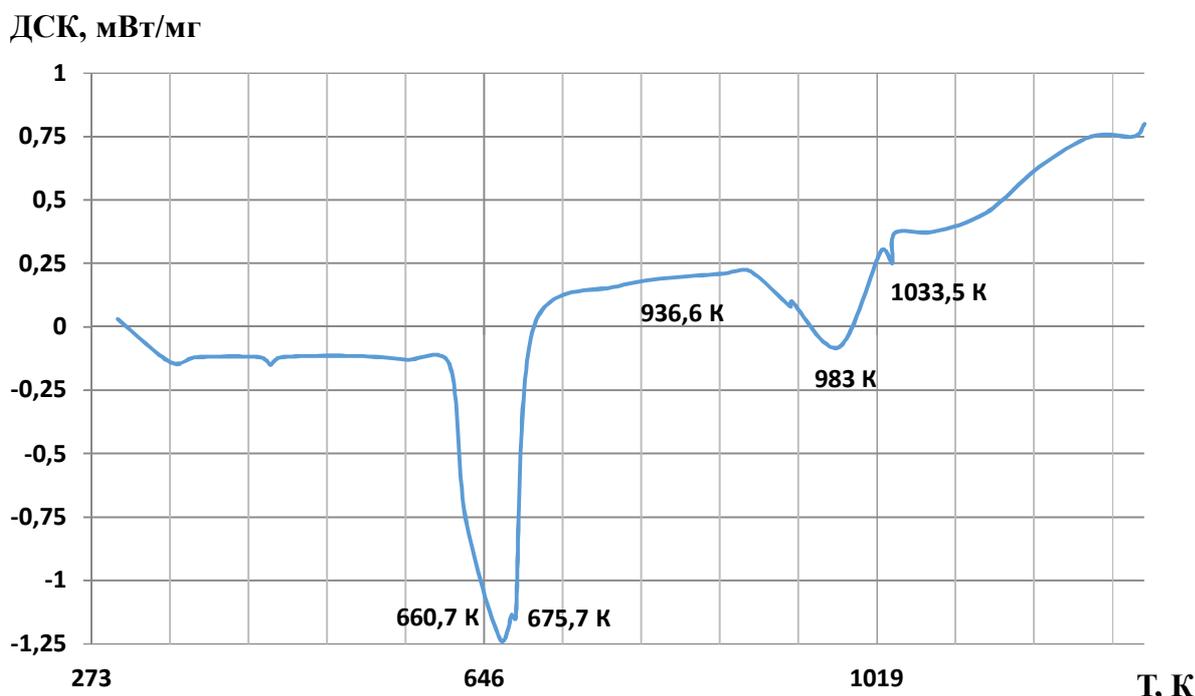


Рис. 1. Термический анализ колеманита: дифференциальная сканирующая калориметрия, ДСК

Анализ полученной термограммы процесса дегидратации колеманита позволил выявить следующие закономерности: кривая ДТГ характеризуется двумя эндотермическими эффектами и тремя эндотермическими эффектами. Рассмотрим каждый пик.

Эндотермическая впадина с минимумами при 660,7 К и 675,7 К связана с удалением физически связанной воды.

В справочном издании [22] колеманит представлен формулой $\text{CaV}_2\text{VO}_4(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, из кото-

рой следует, что в его составе имеется кристаллизационная вода и гидроксильные группы. В этой связи можно предположить что первый эндоэффект связан с удалением молекул воды из структуры колеманита, а второй эндотермический эффект – с удалением гидроксильных групп и аморфизацией колеманита.

По мнению ряда авторов [14-17] процесс дегидратации колеманита заканчивается при 773 К. В связи с этим для определения энергии активации при анализе кривой ТГ потеря массы при 773 К была принята за 100 % (табл. 1). Данные для расчета энергии активации и построения графика зависимости в координатах $1/T \cdot 10^{-3} - (\lg m - 2 \lg T)$ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Кинетика дегидратации колеманита

T, К	Потеря массы, %	Потеря H ₂ O в пересчете на 100 %	lg m	2 lg T	lg m - 2 lg T
513	1,25	7,23	0,8591	5,4202	-4,5611
523	1,35	7,80	0,8921	5,4370	-4,5449
548	1,55	8,96	0,9523	5,4774	-4,5251
573	1,75	10,12	1,0052	5,5162	-4,5110
598	2,15	12,42	1,0941	5,5534	-4,4593
623	2,80	16,18	1,2090	5,5888	-4,3798
648	3,45	19,94	1,2997	5,6232	-4,3235
660,9	3,9	22,54	1,3530	5,6402	-4,2872
673	6,0	34,68	1,5401	5,6560	-4,1159
674,9	7,25	41,91	1,6223	5,6584	-4,0361
698	13,15	76,01	1,8809	5,6876	-3,8067
723	15,0	86,71	1,9381	5,7182	-3,7801
748	16,25	93,64	1,9781	5,7447	-3,7666
773	17,3	100	2,000	5,7762	-3,7762

График для определения энергии активации представлен на рис. 2. По полученным данным

энергия активации процесса дегидратации колеманита в интервале температур 293–773 К составляет 86 кДж/моль.

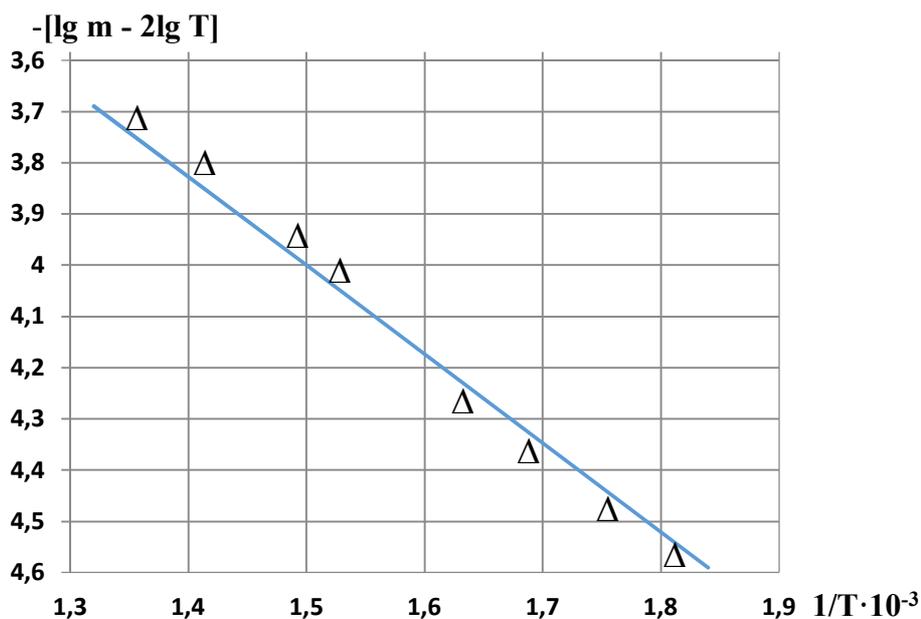


Рис. 2. График для определения энергии активации

Для более детальной идентификации эндотермических эффектов рассчитаны мгновенные

значения скорости дегидратации колеманита в интервале температур 513–773 К (табл. 2).

Параметры зависимости скорости дегидратации колеманита от температуры

T	τ	$\Delta\tau$, мин	m	Δm	$\frac{dm}{d\tau}; \left(\frac{d\alpha}{d\tau}\right)$
513	51,3		0,0793		
523	52,3	1,0	0,0780	0,0057	0,0057
548	54,8	2,5	0,0896	0,0116	0,00464
573	57,3	2,5	0,1012	0,0116	0,00464
598	59,8	2,5	0,1242	0,0230	0,0092
623	62,3	2,5	0,1618	0,0376	0,01504
648	64,8	2,5	0,1994	0,0376	0,01504
660,9	66,09	1,29	0,2254	0,026	0,02015
673	67,3	1,21	0,3468	0,1214	0,10033
674,9	67,49	0,49	0,4191	0,0723	0,14755
698	69,8	2,31	0,7601	0,3407	0,14748
723	72,3	2,5	0,8671	0,1070	0,0428
748	74,8	2,5	0,9364	0,0693	0,02772
773	77,3	2,5	1,00	0,0636	0,025714

График зависимости скорости дегидратации колеманита от температуры показывает, что максимальная скорость дегидратации наблюдается в интервале температур 653–678 К (рис. 3).

Анализируя дифференциально-сканирующую кривую дегидратации колеманита можно сделать вывод, что два эндотермических эффекта

660,9 К и 675,7 К расположены близко относительно друг друга и накладываются друг на друга.

Аналогичные особенности расположения эндотермических эффектов дифференциально-сканирующей кривой при скорости нагрева 10 °С/мин наблюдаются при дегидратации $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O} (\text{CAN}_{10})$ в глиноземистом цементе [23].

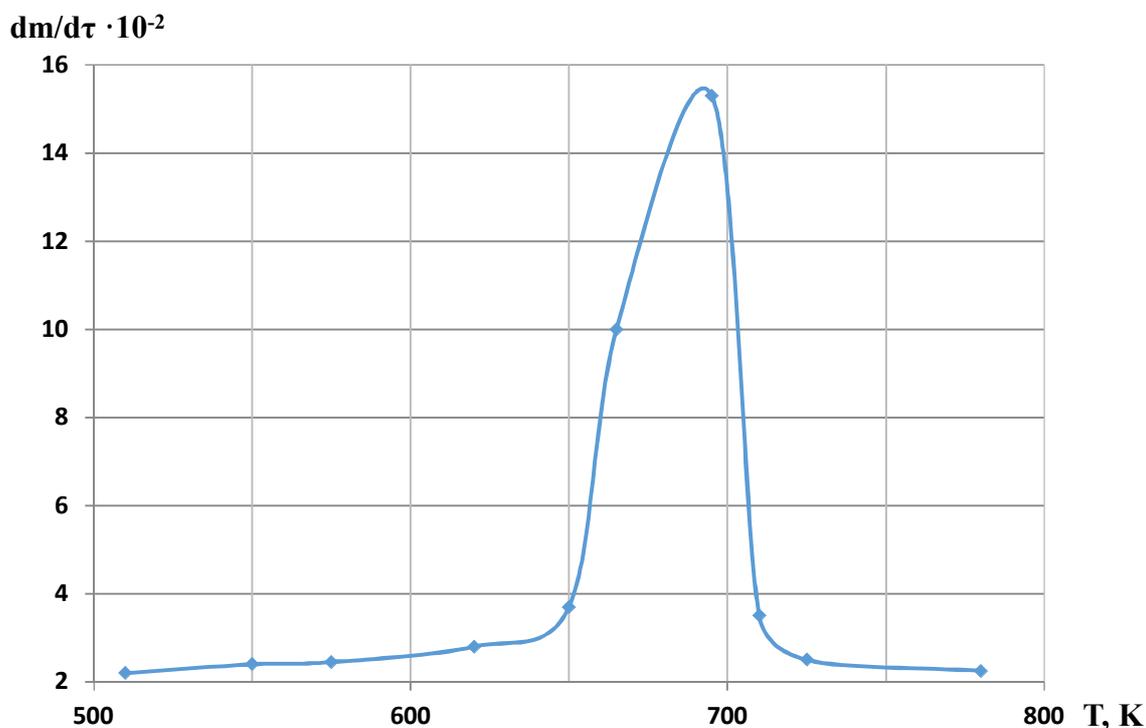


Рис. 3. Скорость процесса дегидратации колеманита

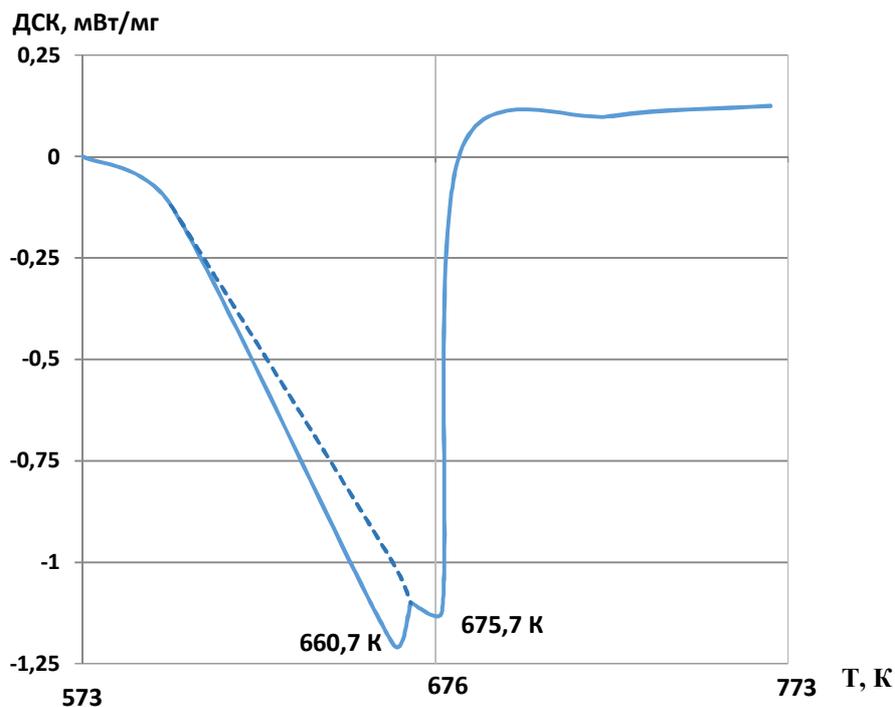


Рис. 4. Дифференциально-сканирующая кривая дегидратации колеманита

Рамачандран объясняют такое расположение эндотермических эффектов двухступенчатым процессом дегидратации САН_{10} [24].

В нашем случае в составе колеманита имеются молекулы воды и гидроксильные группы, которые имеют разные энергии связи.

По мнению Паоло Лотти на первом этапе процесса дегидратации колеманита удаляются молекулы воды, а затем гидроксильные группы [18]. Это косвенно подтверждается различными значениями потери массы в интервале температур 513–648 К и 648–773 К [18].

В связи с вышеизложенным нами предлагается интерпретировать наличие двух эндотермических эффектов двухступенчатым процессом дегидратации колеманита. На рисунке 4 второй эндотермический эффект при 674,9 К, который

поглощается первым эндотермическим эффектом, обозначен пунктиром.

Процесс дегидратации колеманита может быть описан кинетическим уравнением:

$$\frac{d\alpha}{dt} = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot (1 - \alpha)^n \quad (1)$$

где $\frac{d\alpha}{dt}$ – скорость процесса дегидратации колеманита; K_0 – предэкспоненциальный множитель, мин^{-1} ; E – энергия активации, кДж/моль ; R – универсальная газовая постоянная, равная $8,314 \text{ кДж/моль}\cdot\text{К}$; T – температура, К ; α – степень превращения вещества (потеря массы).

К кинетическому уравнению K_0 характеризует количество элементарных актов в единицу времени. Данный параметр определяется по графику в логарифмических координатах (рисунок 5).

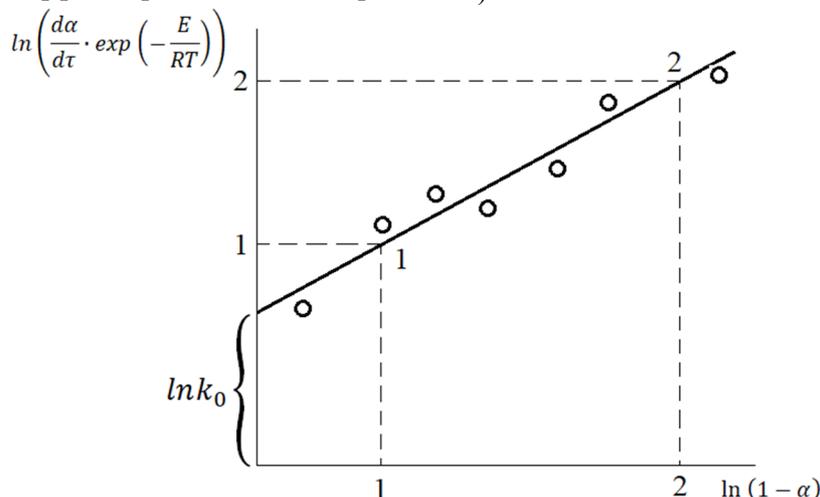


Рис. 5. График проверки адекватности модели дегидратации

Обычно большую часть кинетической кривой удовлетворительно описывает формальное уравнение кинетики [25]. В связи с этим для определения K_0 нами выбрано формальное уравнение кинетики $(1 - \alpha)^n$.

По экспериментально полученным зависимостям было определено значение предэкспоненциального множителя K_0 , равное $2,36 \cdot 10^3$.

Для нахождения n в формальном уравнении кинетики решали систему уравнений:

$$\begin{cases} \ln \left[\frac{d\alpha_1}{d\tau_1} \cdot e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} \right] = \ln K_0 \pm n \cdot \ln(1 - \alpha_1) \\ \ln \left[\frac{d\alpha_2}{d\tau_2} \cdot e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} \right] = \ln K_0 \pm n \cdot \ln(1 - \alpha_2) \end{cases} \quad (2)$$

Проведенные расчеты позволили определить $n = 1,25$ в формальном уравнении кинетики $(1 - \alpha)^n$.

Процесс дегидратации колеманита удовлетворительно описывается кинетическим уравнением:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = 2,36 \cdot 10^3 \cdot \exp\left(-\frac{86000}{RT}\right) \cdot (1 - \alpha)^{1,25} \quad (3)$$

Разделяя переменные и интегрируя данное выражение, получаем:

$$k\tau = -\frac{(1-\alpha)^n}{1-n} = -\frac{(1-\alpha)^{1,25}}{1-1,25} = 0,25^{-1} \cdot (1 - \alpha)^{1,25} \quad (4)$$

где $k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$.

Процесс двухступенчатой дегидратации колеманита удовлетворительно описывается полученным кинетическим уравнением в интервале температур 513-773 К.

Заключение. Исследован процесс дегидратации колеманита в неизотермических условиях в интервале температур 513–773 К при скорости нагрева 10 °С/мин. На основе экспериментальных данных определена энергия активации процесса дегидратации колеманита, равная 86000 Дж/моль.

Предложен двухступенчатый механизм дегидратации колеманита, характеризующий на первом этапе потерю кристаллизационной воды, а на втором этапе – гидроксильных групп. Этим может быть объяснено наличие близко расположенных друг к другу два эндотермических эффекта при 660,9 К и 675,7 К.

С использованием формального уравнения кинетики удовлетворительно описан двухступенчатый процесс дегидратации колеманита.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жерновая Н.Ф., Дороганов Е.А., Бессмертный В.С., Дорохова Е.С., Жерновой Ф.Е. Стеклокерамический композит с мультифункциональной колеманитной добавкой // Перспективные материалы, 2016. №5. С. 51–58.

2. Жерновая Н.Ф., Бессмертный В.С., Жерновой Ф.Е., Дорохова Е.С., Изотова И.А. Безусадочный облицовочный материал на основе стеклолобя и колеманита // Стекло и керамика. 2016. №3. С. 34–37.

3. Дорохова Е.С., Жерновая Н.Ф., Бессмертный В.С., Жерновой Ф.Е., Тарасова Е.Е. Управление структурой пористого стеклокерамического материала // Стекло и керамика. 2017. №3. С. 28–31.

4. Гулюян Ю.А. Технология стекла и стеклоизделий. // Владимир: Транзит-ИКС, 2015. 710 с.

5. Павлюкевич Ю.Г., Левицкий И.А., Мазура Н.В. Использование колеманита в производстве стеклянного волокна // Стекло и керамика, 2009. №10. С. 9–13.

6. Павлюкевич Ю.Г., Папко Л.Ф., Хлыстов С.П., Солджунер Е.А. Влияние борсодержащих компонентов на технологические свойства базальтовых расплавов и стекол // Стекло и керамика. 2018. №11. С. 7–12.

7. Кондрашов В.И. Вариативное производство декоративного и функционального флоат-стекла // Glass Russia. 2014. №8. С. 22–24.

8. Yadollahi A., Nazemi E., Zolfaghari A., Ajorloo A.M., Optimization of thermal neutron shield concrete mixture using artificial neural network // Nucl. Eng. Des. 2016. № 305. Pp. 146–155.

9. Demir F., Budak G., Sahin R., Karabulut A., Oltulu M., Serifoglu K., Un A. Radiation transmission of heavyweight and normal-weight concretes containing colemantite for 6 MV and 18 MV X-rays using linear accelerator // Ann. Nucl. Energy. 2010. №37. Pp. 339–344.

10. Erdogmus E., Erdoğan Y., Gencel O., Targan S., Avcıata U., Influence of colemantite admixture on Portland cement durability // Adv. Cem. Res, 2012. №24. Pp. 155–164.

11. Glinicki M.A., Antolik A., Gawlicki M., Evaluation of compatibility of neutron-shielding boron aggregates with Portland cement in mortar // Constr. Build. Mater. 2018. № 164. Pp. 731–738.

12. Федосов С.В., Акулова М.В., Слизнева Т.Е., Потемкина О.В. Термогравиметрические исследования фазовых превращений в цементных композициях на механоактивированном растворе силиката натрия // Вестник МГСУ. 2013. С. 111–118.

13. Федосов С.В., Акулова М.В., Потемкина О.В., Емелин В.Ю., Белякова Н.А. Исследование изменения фазового состава пенобетона с добавлением жидкого стекла и стеклолобя термогравиметрическим методом // Строительство и реконструкция. 2013. №3 (47). С. 69–77.

14. Hartung E., Heide K., Investigation of Phase Transitions of Hydrated Borates at Non-isothermal Conditions // Krist. Tech. 1978. Pp. 57–60.

15. Waclawska, L. Stoch, J. Paulik, F. Paulik, Thermal decomposition of colemanite // *Thermochim. Acta*. 1988. № 126. Pp. 307–318.

16. Frost R.L., Scholz R., Ruan X., Fernandes Lima R.M., Thermal analysis and infrared emission spectroscopy of the borate mineral colemanite ($\text{CaB}_3\text{O}_4(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2016. № 124. Pp. 131–135.

17. Rusen, Investigation of structural behavior of colemanite depending on temperature // *Rev. Rom. Mat.* 2018. № 48. Pp. 245–250.

18. Paolo Lotti, Davide Comboni, Lara Gigli, Lucia Carlucci, Eros Mossini, Elena Macerata, Mario Mariani, Gatta G. Diego. Thermal stability and high-temperature behavior of the natural borate colemanite: An aggregate in radiation-shielding concretes // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 203. Pp. 679–686.

19. Anthony J.W., Bideaux R.A., Bladh K.W., Nichols M.C. (Eds.) *Handbook of Mineralogy*, Mineralogical Society of America, Chantilly, <http://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/colemanite.pdf>

20. Helvacı C., *Stratigraphy, Mineralogy, and Genesis of the Bigadiç Deposits, Western Turkey* // *Econ. Geol.* 1995. №90. Pp. 1237–1260.

21. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. *Методы физико-химического анализа вяжущих веществ: Учеб. пособие*. М.: Высш. школа, 1981. 335 с.

22. Фекличев В.Г. *Диагностические спектры минералов*. М., «Недра», 1977. 228 с.

23. Бондаренко Н.И., Здоренко Н.М., Ляшко А.А., Волошко Н.И., Антропова И.А., Бурлаков Н.М. Исследование кинетики дегидратации гидроралюминатов алюминатного цемента // *Международный журнал экспериментального образования*. 2015. №12. Ч. 2. 252 с.

24. Рамачандран В.С. *Применение дифференцированного термического анализа в химии цементов*. Под ред. В.Б. Ратинова. Пер. с англ. М., Стройиздат, 1977. 408 с.

25. Браун М., Доллимор Д., Галвей А. *Реакции твердых тел: Пер. с англ.* М.: Мир, 1983. 360 с.

Информация об авторах

Бессмертный Василий Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры стандартизации и управления качеством. E-mail: vbessmertnyi@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бондаренко Марина Алексеевна, аспирант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: bond.marinka@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Пучка Олег Владимирович, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой стандартизации и управления качеством. E-mail: oleg8a@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Черкасов Андрей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: andrey.bstu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Изотова Ираида Алексеевна, аспирант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: izotova.iren@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Брагина Валерия Сергеевна, студент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: valeriya3331bragin@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Платов Юрий Тихонович, профессор кафедры товароведения и товарной экспертизы. E-mail: Platov.YT@gea.ru. Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Россия, 117997, Москва, Стремянный пер., д. 36.

Брагина Людмила Лазаревна, доктор технических наук, профессор кафедры технологии керамики, огнеупоров, стекла и эмалей. E-mail: bragina_l@ukr.net. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». Украина, 61002, Харьков, ул. Кирпичева, д.2.

Поступила 25.02.2021 г.

© Бессмертный В.С., Бондаренко М.А., Пучка О.В., Черкасов А.В., Изотова И.А., Брагина В.С., Платов Ю.Т., Брагина Л.Л., 2021

¹Bessmertny V.S., ^{1,*}Bondarenko M.A., ¹Puchka O.V., ¹Cherkasov A.V.,
¹Izotova I.A., ¹Bragina V.S., ²Platov Yu.T., ³Bragina L.L.
¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
²Plekhanov Russian University of Economics.
³National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
 *E-mail: bond.marinka@mail.ru

THE STUDY OF DEHYDRATION OF COLEMANITE IN NON-ISOTHERMAL CONDITIONS

Abstract. The regularities of colemanite dehydration under non-isothermal conditions are investigated. It is established that colemanite, supplied to the Russian Federation from Turkey, has calcite in its composition. The chemical composition of colemanite is determined using the X-ray fluorescence analysis method. It is shown that the processes of dehydration of colemanite under non-isothermal conditions at a heating rate of 10 °C / min are accompanied by two endothermic effects at 660,7 K and 675,7 K with a total mass loss of 17,3 %. The rate of mass loss of colemanite from the temperature at heating up to 773 K, at which colemanite dehydrates and passes into the amorphous phase, is also studied. The regularities of changes in the rate of dehydration of colemanite are established. It is shown that the maximum values of the dehydration rate of colemanite are observed in the temperature range of 653–678 K. The activation energy of colemanite dehydration is determined to be 86,000 J/mol. Based on the experimentally obtained data, the rate constant of the colemanite dehydration process is calculated. The process of dehydration of colemanite is adequately described by the formal equation of kinetics. Most of the kinetic curve is adequately described by the resulting kinetic equation. It is proposed to describe the mechanism of dehydration of colemanite by a two-stage process, accompanied at the first stage by the removal of crystallization water, and at the second stage-by the removal of hydroxyl groups.

Keywords: colemanite, dehydration, non-isothermal conditions, activation energy, endothermic effects, kinetic equation.

REFERENCES

- Zhernovaya N.F., Doroganov E.A., Bessmertny V.S., Dorokhova E.S., Zhernovoy F.E. Glass-ceramic composite with multifunctional colemanite additive [Steklokeramicheskiy kompozit s mul'tifunktsional'noy kolemanitnoy dobavkoy]. Perspective materials. 2016. No. 5. Pp. 51–58. (rus)
- Zhernovaya N.F., Bessmertny V.S., Zhernovoy F.E., Dorokhova E.S., Izotova I.A. Non-shrink facing material based on cullet and colemanite [Bez-usadochnyy oblitsovochnyy material na osnove stekloboya i kolemanita]. Glass and Ceramics. 2016. No. 3. Pp. 34–37. (rus)
- Dorokhova E.S., Zhernovaya N.F., Bessmertny V.S., Zhernovoy F.E., Tarasova E.E. Management of the structure of a porous glass-ceramic material [Upravlenie strukturoy poristogo steklokeramicheskogo materiala]. Glass and Ceramics. 2017. No. 3. Pp. 28–31. (rus)
- Guloyan Yu.A. Technology of glass and glass products [Tekhnologiya stekla i stekloizdeliy]. Vladimir: TRANZIT-IKS, 2015. 710 p. (rus)
- Pavlyukevich Y.G., Levitsky I.A., Mazur N.In. The use of colemanite in the production of glass fiber [Ispol'zovanie kolemanita v proizvodstve steklyannogo volokna]. Glass and ceramics. 2009. No. 10. Pp. 9–13. (rus)
- Pavlyukevich Y.G., Filo L.F., Whips S.P., Calguner E.A. Influence of boron-containing components on the technological properties of basaltic melts and glasses [Vliyanie borsoderzhashchikh komponentov na tekhnologicheskie svoystva bazal'tovykh rasplavov i stekol]. Glass and ceramics. 2018. No. 11. Pp. 7–12. (rus)
- Kondrashov V.I. Variable manufacturing decorative and functional float glass [Variativnoe proizvodstvo dekorativnogo i funktsional'nogo float-stekla]. Glass Russia. 2014. No. 8. Pp. 22–24. (rus)
- Yadollahi A., Nazemi E., Zolfaghari A., Ajorloo A.M., Optimization of thermal neutron shield concrete mixture using artificial neural network. Nucl. Eng. Des. 2016. No 305. Pp. 146–155.
- Demir F., Budak G., Sahin R., Karabulut A., Oltulu M., Serifoglu K., Un A. Radiation transmission of heavyweight and normal-weight concretes containing colemanite for 6 MV and 18 MV X-rays using linear accelerator. Ann. Nucl. Energy. 2010. No. 37. Pp. 339–344.
- Erdogmus E., Erdoğan Y., Gencil O., Targan S., Avcıata U., Influence of colemanite admixture on Portland cement durability. Adv. Cem. Res. 2012. No 24. Pp. 155–164.
- Glinicki M.A., Antolik A., Gawlicki M., Evaluation of compatibility of neutron-shielding boron aggregates with Portland cement in mortar. Constr. Build. Mater. 2018. No 164. Pp. 731–738.

12. Fedosov S.V., Akulova M.V., Slizneva T.E., Potemkina O.V. Thermogravimetric studies of phase transformations in cement compositions on a mechanoactivated solution of sodium silicate [Termogravimetrichekie issledovaniya fazovykh prevrashcheniy v tsementnykh kompozitsiyakh na mekhanoaktivirovannom rastvore silikata natriya]. Vestnik MGSU. 2013. Pp. 111–118. (rus)
13. Fedosov S.V., Akulov V.M., Potemkin O.V., Emelin V.Yu., Belyakova N.A. The study of changes in the phase composition of the foam with the addition of liquid glass and cullet thermogravimetric method [Issledovanie izmeneniya fazovogo sostava penobetona s dobavleniem zhidkogo stekla i stekloboya termogravimetrichekim metodom]. Construction and reconstruction. 2013. No. 3 (47). Pp. 69–77. (rus)
14. Hartung E., Heide K. Investigation of Phase Transitions of Hydrated Borates at Non-isothermal Conditions. Krist. Tech. 1978. Pp. 57–60.
15. Waclawska, Stoch L., Paulik J., Paulik F. Thermal decomposition of colemanite. Thermochim. Acta. 1988. No. 126. Pp. 307–318.
16. Frost R.L., Scholz R., Ruan X., Fernandes R.M. Lima, Thermal analysis and infrared emission spectroscopy of the borate mineral colemanite ($\text{CaB}_3\text{O}_4(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). J. Therm. Anal. Calorim. 2016. No 124. Pp. 131–135.
17. Rusen, Investigation of structural behavior of colemanite depending on temperature. Rev. Rom. Mat. 2018. No 48. Pp. 245–250.
18. Paolo Lotti, Davide Comboni, Lara Gigli, Lucia Carlucci, Eros Mossini, Elena Macerata, Mario Mariani, Gatta G. Diego. Thermal stability and high-temperature behavior of the natural borate colemanite: An aggregate in radiation-shielding concretes. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 203. Pp. 679–686.
19. Anthony J.W., Bideaux R.A., Bladh K.W., Nichols M.C. (Eds.) Handbook of Mineralogy, Mineralogical Society of America, Chantilly, <http://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/colemanite.pdf>
20. Helvacı C., Stratigraphy, Mineralogy, and Genesis of the Bigadiç Deposits, Western Turkey. Econ. Geol. 1995. No 90. Pp. 1237–1260.
21. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savelyev V.G. Methods of physical and chemical analysis of astringent substances: Textbook. [Metody fiziko-khmicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv: Ucheb. posobie]. M.: Higher School, 1981. 335 p. (rus)
22. Feklichev V.G. Diagnostic spectra of minerals [Diagnosticheskie spektry mineralov]. M.: Nedra, 1977. 228 p. (rus)
23. Bondarenko N.I., Zdorenko N.M., Lyashko A.A., Voloshko N.I., Antropova I.A., Burlakov N.M. Investigation of dehydration kinetics of aluminate cement hydroaluminates [Issledovanie kinetiki degidratatsii gidroalyuminatov alyuminatnogo tsementa]. International Journal of Experimental Education. 2015. No. 12. Ch. 2. 252 p. (rus)
24. Ramachandran V.S. Application of differentiated thermal analysis in cement chemistry [Primenenie differentsirovannogo termicheskogo analiza v khimii tsementov]. Ed. by V. B. Ratinov. Per. s engl. M., Stroyizdat, 1977. 408 p. (rus)
25. Brown M., Dollimore D., Galvey A. Reactions of solid bodies: Trans. from English [Reaktsii tverdykh tel: Per. s engl.]. M.: Mir, 1983. 360 p. (rus)

Information about the authors

Vasily S. Bessmertnyy, DSc, Professor. E-mail: vbessmertnyi@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Marina A. Bondarenko, graduate student. E-mail: bond.marinka@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Oleg V. Pucka, candidate of technical Sciences, Professor. E-mail: oleg8a@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Andrey V. Cherkasov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: andrey.bstu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Iraida A. Izotova, graduate student. E-mail: izotova.iren@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Valeria S. Bragina, student. E-mail: valeriya3331bragin@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Yuri T. Platov, Professor. E-mail: Platov.YT@rea.ru. Plekhanov Russian University of Economics. Russia, 117997, Moscow, per. Stremyanny, 36.

Lyudmila L. Bragina, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: bragina_1@ukr.net. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Ukraine, 61002, Kharkiv, st. Kirpicheva, 2.

Received 25.02.2021

Для цитирования:

Бессмертный В.С., Бондаренко М.А., Пучка О.В., Черкасов А.В., Изотова И.А., Брагина В.С., Платов Ю.Т., Брагина Л.Л. Исследование дегидратации колеманита в неизотермических условиях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 3. С. 97–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-3-97-106

For citation:

Bessmertniy V.S., Bondarenko M.A., Puchka O.V., Cherkasov A.V., Izotova I.A., Bragina V.S., Platov Yu. T., Bragina L.L. The study of dehydration of colemanite in non-isothermal conditions. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 3. Pp. 97–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-3-97-106