

УДК 66.041.3-65:691.034.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕРМИКУЛИТ-СУНГУЛИТОВЫХ КОНГЛОМЕРАТОВ ПРИ ИХ ТЕРМОАКТИВАЦИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

Рассмотрены основы технологии и теории процесса термоактивации вермикулит-сунгулитовых конгломератов, содержащихся в отходах Ковдорского флогопит-вермикулитового месторождения. Построена аналитико-физическая модель однослойного потока вермикулит-сунгулитового конгломерата, вибротранспортируемого в тепловом поле с помощью вибрационной подовой платформы электрической печи. Определена поглощательно-отражательная способность плотного однослойного массива обрабатываемого конгломерата, находящегося на плоскости в условиях теплового излучения. На примере сунгулита, пироксена, оливина и ряда других минералов показана корреляция их поглощательной способности с относительной температуропроводностью и теплопроводностью этих минералов.

Ключевые слова: вермикулит-сунгулитовый конгломерат, пироксен-оливиновая порода, поглощательно-отражательная способность, аналитико-физическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Электрические печи с вибрационной подовой платформой [1] предназначены не только для обжига вермикулита, но и для термообработки других минералов, например вермикулит-сунгулитовых конгломератов, содержащихся в отходах Ковдорского флогопит-вермикулитового месторождения [2]. Такое сочетание минералов вермикулита, сунгулита (относящегося к группе серпентинов) и оливин-пироксеновой породы позволяет рассмотреть наиболее общий случай моделирования оптических свойств потенциально термоактивируемых минералов в процессе их тепловой обработки. Оптические свойства чистого вермикулита, когда он движется однослойным плотным потоком в тепловом поле, описаны в статье [2].

Цель настоящей работы — получение аналитико-физической модели, описывающей оптические свойства вермикулит-сунгулитовых конгломератов (поглощательно-отражательную способность однослойного массива) при их термоактивации в электрических печах с вибрационной подовой платформой в условиях теплового излучения.

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ

Изучение термоактивированных серпентиновых минералов показало, что из них можно получать

магнезиально-силикатные реагенты, которые используют в природоохранных технологиях для детоксикации техногенно загрязненных почв и водных объектов путем снижения геохимической подвижности тяжелых металлов [4, 5]. Преимуществами такого реагента, получаемого из вермикулит-сунгулитовых конгломератов, являются сочетание в одном продукте положительных свойств обоих минералов и возможность существенно снизить стоимость работ за счет использования некондиционного сырья — горнопромышленных отходов [5].

В базовом сырье основными минералами являются (мас. %): сунгулит (~10 %), вермикулит (~13 %), пироксен и оливин (~50 %), остальное — антигорит и другие минералы [3]. Технология их разделения, разработанная в Горном институте Кольского научного центра, включает дробление, обогащение в гидросепараторе с отведением слива, сушку и магнитную сепарацию [6]. Получаемая немагнитная фракция является носителем целевых продуктов: вермикулита (~34 %) и сунгулита (~23 %), оливин-пироксеновых пород (~39 %). Выход немагнитной фракции составляет 13 % [6]; она и является исходным сырьем и объектом моделирования.

Насыпная плотность сунгулита около 1026 кг/м³, он на 21 % легче оливин-пироксеновой фазы (~1300 кг/м³). При термообработке сунгулит дополнительно теряет 15–18 % массы из-за выхода химически связанной (гидратной) воды, а оливин-пироксеновая фаза почти не изменяется [6]. Поэтому после термоактивации и выдержки при температуре в течение 20–25 мин с помощью аэродинамического разделения компонентов остаточный продукт (сунгулит)



А. И. Нижегородов

E-mail: nastromo_irkutsk@mail.ru

подвергается вибросегрегации для окончательного удаления оливин-пироксеновой фазы. Так, может быть получен вспученный вермикулит и сунгулитовый концентрат с содержанием сунгулита 90–95 мас. %. Эффективность активации сунгулита возрастает с увеличением скорости нагрева, поэтому оптимальным режимом его обработки будут термоудар и выдержка («томление») при 550–600 °C в течение 20–25 мин [3, 7]. Для реализации такого режима со скоростью нагрева 210–250 °C/с как раз и предназначены печи с вибрационно-подовой платформой.

Специфика процесса термоактивации сунгулита состоит в том, что одновременно с ним нагреву подвергаются оливин-пироксеновая фаза и вермикулит. Поглощаемое им тепло сразу совершает работу вспучивания, а энергия нагрева пироксена и оливина становится вторичным энергоресурсом. Нагреваясь быстрее, оливин-пироксеновая фаза начинает излучать тепловую энергию и на вермикулит, и на сунгулит. Таким образом, часть вторичного ресурса совершает полезную работу еще до выхода из печи.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРОЦЕССА

Сопоставим скорости нагрева компонентов сырьевого конгломерата по их температуропроводности [8]:

$$\chi = \lambda / \rho c, \quad (1)$$

где λ — теплопроводность, Вт/(м·К); ρ — истинная плотность минералов, кг/м³; c — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К).

Рассчитаем температуропроводность. Для оливина она составляет $\chi_o = \lambda_o / \rho_o c_o = 5,0 / 2300 \cdot 795 = 2,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с, для пироксена $\chi_n = \lambda_n / \rho_n c_n = 4,38 / 2300 \cdot 748 = 2,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с, для сунгулита $\chi_c = \lambda_c / \rho_c c_c = 2,085 / 1760 \cdot 950 = 1,2 \cdot 10^{-6}$ м²/с, для вермикулита $\chi_v = \lambda_v / \rho_v c_v = 0,06 / 200 \cdot 879 = 0,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Значения λ , ρ и c минералов получены из источников [9–11]. Среднее значение температуропроводности для оливина и пироксена составляет $\chi_{o,n} = 2,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Рассмотрим соотношения:

$$\chi_{o,n} / \chi_v = 2,6 \cdot 10^{-6} / 0,3 \cdot 10^{-6} = 8,8, \quad (2)$$

$$\chi_{o,n} / \chi_c = 2,6 \cdot 10^{-6} / 1,2 \cdot 10^{-6} = 2,2. \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3) следует, что оливин-пироксеновая фаза достигнет конечной температуры почти в 9 раз быстрее, чем вермикулит, так как он не вспучивается и не изолирует себя, и примерно в 2 раза быстрее, чем сунгулит. Вибротранспортирование частиц конгломерата за счет колебаний и наклона платформы печи организовано таким образом, что материал идет сплошным потоком практически без зазоров между ними. Конструктивные (длина и ширина) и динамические (частота и амплитуда) параметры вибрационной подовой плиты платформы должны обеспечивать достаточное время для завершения теплообменных процессов. При этом зерна

сунгулита будут располагаться между пироксеновыми и оливиновыми частицами, а более легкие зерна вспучивающегося вермикулита — над ними. Это и создает максимально благоприятные условия для переноса лучистой энергии от более горячих частиц оливина и пироксена к менее горячим вермикулитовым и сунгулитовым частицам. Параллельно идет кондуктивный перенос теплоты с горячих поверхностных слоев вермикулитовых зерен в глубинные слои, сопровождающийся выравниванием их температур, дегидратацией и довспучиванием. Очевидно, что нагрев бесполезной оливин-пироксеновой породы частично компенсирует затраты энергии за счет переноса части теплоты на полезные целевые продукты — вермикулит и сунгулит.

Далее находим значения усвоенных тепловых энергий минералами, входящими в состав сырьевого вермикулит-сунгулитового конгломерата, с учетом температур их нагрева к моменту выхода из модулей печи с подвижными подами. Для оливин-пироксеновой фазы и сунгулита эти энергии соответственно равны:

$$\theta_{o,n} = 0,39 c_{o,n} \cdot 0,95 m T_{o,n}, \quad (4)$$

$$\theta_c = 0,23 c_c \cdot 0,95 \cdot 0,945 m T_c, \quad (5)$$

где 0,39 и $c_{o,n}$ — средняя удельная теплоемкость оливин-пироксеновой фазы 772 Дж/(кг·К) и их массовая доля в конгломерате; 0,23 и c_c — удельная теплоемкость 950 Дж/(кг·К) и массовая доля сунгулита; 0,95 — коэффициент, учитывающий потерю массы минерала за счет выхода физической воды (при 5 % влажности); m — масса исходного конгломерата (1 кг); 0,945 — коэффициент, учитывающий неполную потерю массы при выходе химически связанной воды (15–18 % [3]) с остаточной массовой долей 4–7 %; $T_{o,n}$ — примерная средняя температура перегрева оливин-пироксена (715 °C = 988 K); T_c — примерная средняя температура недогретого сунгулита (545 °C = 818 K).

Расчет по формулам (4) и (5) дает следующие значения: $\theta_{o,n} = 282594$ Дж = 282,6 кДж, $\theta_c = 160457$ Дж = 160,5 кДж. Энергия теплоусвоения сунгулита при 600 °C (873 K) и полном выходе химически связанной воды будет равна: $\theta_c = 0,23 c_c \cdot 0,95 \cdot 0,835 m T_c = 151313$ Дж (151,3 кДж). Тогда с учетом баланса энергий при теплоусвоении вермикулита аналитическое выражение модели теплоусвоения вермикулит-сунгулитового конгломерата $\theta_{v,c,k}$ будет иметь вид

$$\theta_{v,c,k} = 0,38 \theta_v + \theta_c + \theta_{o,n}, \quad (6)$$

где 0,38 — массовая доля вермикулита в конгломерате.

АНАЛИТИКО-ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕРМИКУЛИТ-СУНГУЛИТОВОГО КОНГЛОМЕРАТА

В отличие от трансформирующегося вермикулита сунгулит и оливин-пироксеновая порода конгло-

мерата при нагревании морфологически стабильны, поэтому в диапазоне от 100 до 500–600 °С изменения их формы, размеров и оптических свойств пренебрежимо малы.

Анизотропия торцевых и боковых поверхностей вспученных или частично вспученных зерен вермикулита очевидна, так как зерна обладают слоисто-пористой структурой. А частицы сунгулита, пироксена и оливина можно считать оптически изотропными, если не учитывать их некруглые формы. Поэтому алгоритм нахождения коэффициентов поглощения, отражения и пропускания, использованный для однослойного вермикулитового потока [2], в данном случае существенно упрощается. Но следует учесть, что компоненты вермикулит-сунгулитового конгломерата имеют разные цвета (рис. 1). Сунгулит — светлый, а оливин-пироксеновая порода Ковдорского месторождения — темная, и можно ожидать, что ее поглощательная способность будет несколько выше.

При построении аналитико-физической модели оптических свойств потока вермикулит-сунгулитового конгломерата примем в качестве допущений следующее: поглощательная α_c , отражательная ρ_c , излучательная ϵ_c и пропускательная τ_c способности сунгулита являются константами во всем тепловом диапазоне длин волн; поглощательная $\alpha_{o.п.}$, отражательная $\rho_{o.п.}$, излучательная $\epsilon_{o.п.}$ и пропускательная $\tau_{o.п.}$ способности оливин-пироксеновой фазы также являются константами в указанном диапазоне. Однако, как и в случае с

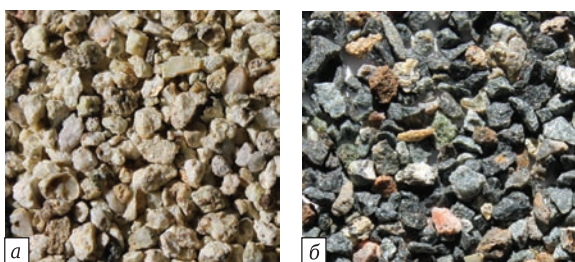


Рис. 1. Разделенные сунгулит (а) и оливин-пироксеновая порода (б)

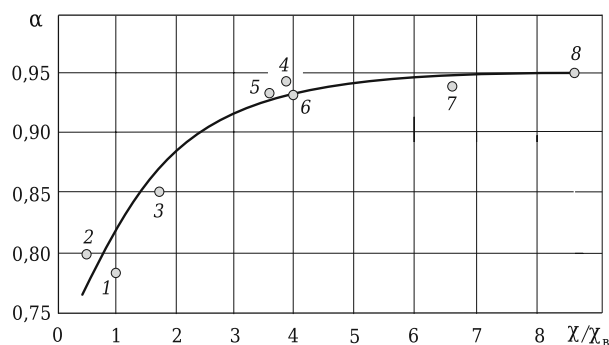


Рис. 2. К оценке корреляции коэффициентов поглощения α разных минералов с относительной температуропроводностью χ_i/χ_v : 1 — вермикулит; 2 — каменный уголь; 3 — гипс; 4 — мрамор; 5 — древесный уголь; 6 — сунгулит; 7 — кварцевое стекло; 8 — оливин-пироксен

вермикулитом [2], значения этих констант неизвестны: их просто нет в справочной литературе.

Обратимся к теплопроводности минералов. Согласно [9] теплопроводность пироксена 4,38, оливина 5,0, серпентина (сунгулита) 1,7–2,47 Вт/(м·К) при среднем значении 2,085 Вт/(м·К). Оливин-пироксеновая порода примерно в 78 раз более теплопроводна, чем вспученный вермикулит, у которого $\lambda_v = 0,06$ Вт/(м·К), и почти в 2,5 раза более теплопроводна, чем сунгулит.

Способность к высоким теплопроводности и температуропроводности [см. соотношения (2) и (3)], хотя и косвенно, указывает на существенно большую поглощательную и меньшую отражательную способность оливин-пироксеновой породы и сунгулита по сравнению со вспученным вермикулитом. Эти закономерности не позволяют аналитически строго рассчитать значения показателей $\alpha_{o.п.}$, $\rho_{o.п.}$, α_c и ρ_c , но однозначно показывают, что поглощательная способность оливин-пироксеновой породы и сунгулита должна быть существенно выше.

Аналитико-физическая модель однослойного движущегося массива вермикулита описывается формулой [2] $\alpha_m + \rho_m + \tau_m = 0,768 + 0,232 = 1$, поэтому можно ориентировочно задать значения коэффициентов $\alpha_{o.п.}$ и α_c между 0,768 и 1,0 с учетом того, что сунгулит в соответствии со значениями теплопроводности и температуропроводности должен иметь несколько меньшую поглощательную способность: для оливин-пироксеновой фазы зададим значения $\alpha_{o.п.} = 0,95$ и $\rho_{o.п.} = 0,05$, для сунгулита — $\alpha_c = 0,93$ и $\rho_c = 0,07$.

Проверим по некоторым другим минералам, есть ли корреляция их поглощательной способности с относительной температуропроводностью χ_i/χ_v , где χ_i — температуропроводность i -го минерала; χ_v — температуропроводность вспученного вермикулита (рис. 2). Значения коэффициентов поглощения и температуропроводности определяли по данным [9–14] и рассчитывали по формуле (1). Хотя нанесенных точек немного, линия, максимально удовлетворяющая им в рассмотренном участке оси абсцисс, указывает на отчетливую корреляционную зависимость параметров.

Однако следует учесть, что, например, все разновидности черных металлов, не обработанных специально, имеют степень черноты ϵ , эквивалентную поглощательной способности α , в пределах 0,93–0,96. При этом отношение χ_i/χ_v достигает 48–72 и находится за пределами поля значений $\alpha - \chi_i/\chi_v$, поэтому график на рис. 2, будучи продолженным в сторону больших значений χ_i/χ_v , показал бы асимптотическое сближение с $\alpha = 1$ абсолютного черного тела. Поэтому представленные данные позволяют считать обоснованной принятую аналитико-физическую модель оптических свойств потока вермикулит-сунгулитового конгломерата.

Но очевидно и то, что не все минералы и искусственные материалы дают столь явную корреля-

цию α с собственными λ и χ или с отношением χ/χ_v . Например, пористые материалы с малой λ и высоким показателем ϵ , а также плотные материалы со специальными покрытиями или отполированными поверхностями. Следовательно, обобщать полученный результат нельзя.

Учитывая массовые доли компонентов (вермикулит 0,38, сунгулит 0,23 и оливин-пироксеновая фаза 0,39), получим формулу аналитико-физической модели оптических свойств однослойного вермикулит-сунгулитового потока:

$$0,38(\alpha_v + \rho_v) + 0,23(\alpha_c + \rho_c) + 0,39(\alpha_{o.p.} + \rho_{o.p.}),$$

где α_v и ρ_v — поглощательная и отражательная способность вермикулита в потоке термообрабатываемого вермикулит-сунгулитового конгломерата.

Используя полученные ранее [2] значения поглощательной и отражательной способности аналитико-физической модели однослойного потока вермикулита, определим средневзвешенные значения главных оптических характеристик потока вермикулит-сунгулитового конгломерата на временном интервале t :

$$\alpha_{в.с.к.} = \frac{0,768 \cdot 0,38 + 0,93 \cdot 0,23 + 0,95 \cdot 0,39}{0,38 + 0,23 + 0,39} = 0,87624, \quad (7)$$

$$\rho_{в.с.к.} = \frac{0,232 \cdot 0,38 + 0,07 \cdot 0,23 + 0,05 \cdot 0,39}{0,38 + 0,23 + 0,39} = 0,12376. \quad (8)$$

Так как сумма поглощательной $\alpha_{в.с.к.}$ и отражательной $\rho_{в.с.к.}$ способности равна нулю, то пропуска-

тельная способность вермикулит-сунгулитового конгломерата равна нулю и, следовательно, согласно этой модели, тепловое излучение не будет падать на подовую плиту вибрационной платформы печи. Конечно, данная аналитико-физическая модель статична, так как в ней заданы фиксированные массовые соотношения компонентов, входящих в конгломерат. Но в каждом конкретном случае следует просто уточнить значения коэффициентов $\alpha_{в.с.к.}$ и $\rho_{в.с.к.}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность термоактивации минералов в электрической печи с вибрационной подовой платформой очевидна: из формул (7) и (8) следует, что 87,6 % падающего на вермикулит-сунгулитовый конгломерат теплового излучения будет полностью им поглощаться и только 12,4 % отразится на термодомину и стенки пространства обжига электрических модулей. Причем чем меньше вермикулита в составе конгломерата, тем выше энергоэффективность агрегата.

Это новое техническое решение оказалось куда существенно более эффективным, чем ранее использовавшиеся электрические модульно-пусковые печи. Поэтому следующий этап работ — создание большого опытно-промышленного образца печи с вибрационной подовой платформой, ее экспериментальные исследования и всесторонние испытания перед запуском в производство.

Библиографический список

1. Пат. 166544 Российская Федерация, МПК F 27 В 9/06. Электрическая печь с вибрационной подовой платформой / Нижегородов А. И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». — № 2015155496/02; заявл. 23.12.2015; опубл. 27.11.2016, Бюл. № 33.
2. Нижегородов, А. И. Аналитическая модель поглощательно-отражательной способности вермикулита в условиях теплового излучения / А. И. Нижегородов, А. В. Звездин, Т. Б. Брянских // Новые огнеупоры. — 2017. — № 1. — С. 15–20.
3. Гершенков, А. Ш. Выделение вермикулитового концентрата из хвостов обогащения вермикулитовых руд и его использование в жаростойком бетоне / А. Ш. Гершенков, М. С. Хошуля, О. Н. Крашенинников // Горный журнал. — 2011. — № 11. — С. 57–59.
4. Кременецкая, И. П. Амorfизация серпентиновых минералов в технологии получения магнезиально-силикатного реагента для иммобилизации тяжелых металлов / И. П. Кременецкая, А. Т. Беляевский, Т. Н. Васильева [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. — 2010. — № 18. — С. 41–49.
5. Кременецкая, И. П. Реагент для иммобилизации тяжелых металлов из серпентинсодержащих вскрышных пород / И. П. Кременецкая, О. П. Корытная, Т. Н. Васильева // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. — 2008. — № 4. — С. 33–40.
6. Терещенко, С. В. Направления комплексного использования отходов добычи флогопита / С. В. Терещенко, И. П. Кременецкая, С. А. Алексеева [и др.] // Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли

: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. В 2 т. РАН, Горный ин-т Кольского научного центра, Апатиты. — СПб.: Реноме, 2014. — Т. 1. — С. 272–279.

7. Nizhegorodov, A. I. Using and assessing energy efficiency of electrical ovens with unit-type releasing intended for thermal energization of sungulite-vermiculite conglomerates / A. I. Nizhegorodov // IOP Conf. Series: materials science and engineering. — 2016. — Vol. 110. — Article 012014. DOI 10.1088/1757-899X/110/1/012014.

8. Телегин, А. С. Тепломассоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. — М.: ИКЦ «Академ-книга», 2002. — 455 с.

9. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика) / справочник геофизика; под ред. Н. Б. Дортман. — М.: Недра, 1984. — 455 с.

10. Казанцев Е. И. Промышленные печи: справочное руководство для расчетов и проектирования / Е. И. Казанцев. — М.: Металлургия, 1975. — 368 с.

11. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.

12. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэл. — М.: Мир, 1975. — 935 с.

13. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.

14. Степень черноты некоторых поверхностей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.chipinfo.pro/infos/emissivity.shtml> (22.12.2016). ■

Получено 17.01.17

© А. И. Нижегородов, 2019 г.