

УДК 66.047

АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТХОДОВ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ

© 2020 г. В. П. Мешалкин^а, С. В. Панченко^б, В. И. Бобков^{б, *}, М. И. Дли^б

^аРоссийский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

^бНациональный исследовательский университет “МЭИ” в г. Смоленске, Смоленск, Россия

*e-mail: vovabobkoff@mail.ru

Поступила в редакцию 06.09.2019 г.

После доработки 17.09.2019 г.

Принята к публикации 28.09.2019 г.

Представлены результаты системного анализа объемов, физико-химических, гранулометрических, литологических и теплофизических характеристик отходов апатит-нефелиновых руд, хранящихся в отвалах (хвостохранилищах) горно-обогатительных комбинатов, для оценки экономического потенциала их использования в системах комплексной энергоресурсоэффективной экологически безопасной переработки, включающих обжиговые машины конвейерного типа и рудно-термические печи. Полученные результаты позволяют сформулировать основные технические, технологические, экономические и экологические требования к сложным химико-энерготехнологическим системам переработки отходов апатит-нефелиновых руд на горно-обогатительных комбинатах, а также определять степень варибельности характеристик партий отходов из различных отвалов.

Ключевые слова: химико-энерготехнологическая система, техногенное сырье, переработка отходов, тепломассообмен, теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность, моделирование

DOI: 10.31857/S0040357120010170

ВВЕДЕНИЕ

Системный анализ теплофизических и химико-технологических свойств фосфоросодержащих техногенных отходов, скопившихся в хвостохранилищах горно-обогатительных и металлургических предприятий, главным образом основывается на экспериментальных исследованиях [1]. Полученные методами монотонного нагрева образцов данные обрабатываются на базе решения обратной коэффицентной задачи теплопроводности для совокупного определения теплофизических и химико-технологических свойств отходов, таких как теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность, и кинетических констант химико-технологических реакций с использованием специально разработанного программного обеспечения [2, 3]. Системное представление свойств фосфоросодержащих отходов базируется на выявлении главных структурных составляющих [4, 5]. Зависимость их свойств от температуры, с учетом реагирующих включений и полупродуктов, представлена в виде многочленов.

Все это дало возможность сформировать процедуру расчета теплофизических характеристик (ТФХ) фосфоросодержащих отходов переработки апатит-нефелиновых руд, различного состава в самом широком диапазоне температур обработ-

ки, с учетом протекания неизотермических химико-технологических реакций [6, 7].

Системный анализ результатов показывает, что начальная теплопроводность и ее изменение при нагреве сильно варьируется для отходов различных месторождений апатит-нефелиновых руд и пород [8, 9]. Термически активируемые химико-энерготехнологические процессы сильно влияют на зависимость ТФХ от температуры [10, 11].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Наличие потока теплоты в фосфоросодержащих отходах переработки апатит-нефелиновых руд обеспечивает неравновесное перераспределение фононов и отличие от равновесного состояния при заданном градиенте температуры определяет теплопроводность. Так как фононы характеризуют энергию колебаний узлов решетки и являются квазичастицами, они определяют характеристики среды. Таким образом, ТФХ твердых тел определяются параметрами фононов. Фононы в твердых телах ассоциируются с “фононным га-

Таблица 1. Некоторые значения длины пробега и времени релаксации фононов составляющих отходов переработки апатит-нефелиновых руд

Порода	$l_f \times 10^9$, м	$\tau_f \times 10^{13}$, с
Кристаллический кварц	9.6 (± 0.3)	1.7 (± 0.06)
Породы кристаллического фундамента	7.7 (± 0.3)	1.1 (± 0.05)
Песчаник	5.7 (± 0.3)	2.9 (± 0.2)
Карбонатные отложения	5.0 (± 0.3)	1.5 (± 0.1)
Глины	3.9 (± 0.35)	2.2 (± 0.25)
Аморфный кварц	4.2 (± 0.15)	0.75 (± 0.03)

зом”, причем температуропроводность и теплопроводность описываются уравнениями [12, 13]

$$a = \frac{1}{3} W_f l_f = \frac{1}{3} W_f^2 \tau_f, \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{1}{3} c_v W_f l_f = \frac{1}{3} c_v W_f^2 \tau_f. \quad (2)$$

Здесь c_v – объемная теплоемкость тела, W_f – скорость упругой волны, l_f – длина свободного пробега фононов, τ_f – время релаксации фононов.

Такие зависимости обоснованно применимы для аморфных, полукристаллических и кристаллических твердых тел. Это описывается квантово-механической теорией взаимодействия фононов. Длина свободного пробега фононов l_f зависит от рассеяния на границах кристаллов, дефектов решетки, состояния аморфности структур, а также от рассеяния на других фононах. Причем последний механизм является основным при высоких температурах. Рассеяние фононов на фононах приводит к зависимости, где $l_f \propto T^{-1}$ [14, 15].

Согласно экспериментальным исследованиям акустических колебаний, для некоторых составляющих отходов переработки апатит-нефелиновых руд получены значения l_f и τ_f (табл. 1).

В зависимости от структуры и размеров кристаллических зерен в породах меняется длина пробега фононов и время релаксации. Таким образом, ТФХ также зависят от кристаллических образований и структуры [13]. Так как длина пробега фононов является одним из основных параметров, определяющих ТФХ материала, то, соответственно, с возрастанием длины пробега увеличивается теплопроводность и температуропроводность отходов. Так, например, для глинистых образований $\lambda \approx 1.01$ Вт/(м К) и $a \approx 5 \times 10^{-7}$ м²/с, а для кристаллических образований $\lambda \approx 3.5$ Вт/(м К) и $a \approx 14 \times 10^{-7}$ м²/с.

Теплоемкость твердых тел кристаллической структуры хорошо описывается формулой Дебая

$$c_v = 3RD(T/\theta_D), \quad (3)$$

где θ_D – температура Дебая, R – универсальная газовая постоянная, $D(x)$ – функция Дебая [16].

Для основных составляющих отходов горно-обогатительных комбинатов апатит-нефелиновых руд для температур, превышающих температуру Дебая ($T \geq 500$ – 1000 К), скорость звука и теплоемкость меняются незначительно, и, значит, теплопроводность обратно пропорциональна температуре $\lambda = 1/T$.

Таким образом, теплопроводность кристаллических тел при высоких и нормальных температурах обратно пропорциональна температуре, что связано с соответствующим уменьшением длины пробега фононов, и, соответственно, температуропроводность аморфных тел слабо зависит от температуры [14]. ТФХ поликристаллических тел, в зависимости от размеров кристаллических зерен, имеют промежуточные значения между кристаллическими и аморфными веществами.

С повышением температуры теплопроводность и температуропроводность для кристаллов и поликристаллических твердых тел приближается к значению аморфных тел и при температуре плавления их разность будет наименьшей.

В табл. 2 представлены данные по значениям коэффициентов теплопроводности техногенного сырья из отвалов горно-обогатительных комбинатов апатит-нефелиновых руд различной структуры. Результаты отражают основные тенденции, характерные для подобных материалов в зависимости от минерального состава и структуры составляющих [17, 18].

В табл. 3 представлены данные по фосфоросодержащим отходам обогащения апатит-нефелиновых руд. Здесь в зависимости от содержания P_2O_5 меняется тип этого техногенного сырья, его мине-

Таблица 2. Зависимость коэффициента теплопроводности отходов переработки апатит-нефелиновых руд от их структуры

Структура	λ , Вт/(м К) при $T = 293$ К	Варьирование λ в интервале температур 273–773 К, %
Чистые монокристаллы	≥ 10	–60
Зернистые	2.7–3.5	–20...–15
Офитовая	2.5–3.0	–15...–5
Микрозернистая	2.1–2.6	–5–5
Микрокристаллическая	1.6–2.1	5–15
Аморфная	1.5–1.9	15–20

Таблица 3. Плотность и теплопроводность фосфоритов различного минералогического состава

Порода	Содержание P_2O_5 , %	$\rho \times 10^{-3}$, кг/м ³	λ , Вт/(м К)
Фосфатизированные (кремни)	0–10	2.4–2.7	7.0–1.0
Доломиты	10–15	2.75–2.85	4.0–2.5
Фосфориты:			
карбонатные	18–25	2.75–2.92	3.0–2.0
высококачественные	25–30	2.9–3.01	2.5–1.8
От высококачественных до субмономинеральных	30–35	2.96–3.10	2.2–1.6
Сланцевые породы	–	3.0 - 3.2	1.7

ральный состав и, соответственно, теплопроводность и плотность. Это показывает наличие закономерности в зависимости ТФХ от минерального состава [19, 20]. Поэтому отыскание обобщенной зависимости от минерального состава и структуры составляющих является весьма актуальной проблемой дальнейших исследований [21, 22]. Конечно, базой построения обобщенных зависимостей от химического состава и температуры являются экспериментальные исследования [23–25].

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Так как минералогический состав фосфоросодержащего техногенного сырья из отвалов горно-обогатительных комбинатов в основном представлен фторкарбонатапатитом $Ca_{10}P_5CO_{24}F_2$, доломитом $CaMg(CO_3)_2$, кальцитом $CaCO_3$, кварцитом и халцедоном SiO_2 , а также прочими примесями, количество составляющих, которые влияют на ТФХ, следует считать конечным, что дает право обозначить наиболее значимые факторы. Зернистая структура этих составляющих в цементирующем носителе позволяет использовать для описания теплопроводности структурные модели. Основная компонента, определяющая структуру модели расчета коэффициента теплопроводности фосфоросодержащих отходов, фосфат, представленный оолитами окатанной формы размером 0.05–0.5 мм.

Типы структур в фосфоросодержащем техногенном сырье:

- матричная с изолированными включениями фосфата;
- переходная от матричной к взаимопроникающей;
- взаимопроникающая инвариантная;
- матричная с изолированными включениями карбонатов и кремнезема.

Для первой структуры характерны фосфатизированные кремни и доломиты с небольшим содержанием (5–12%) фосфатного вещества, бедные фосфоритные, кремнисто-карбонатные, перлитоморфно-кремнистые, забалансовые и метаморфизированные руды с содержанием P_2O_5 около 20%, что соответствует 50% фосфатного вещества. Структурный анализ образцов показывает, что увеличение объемной доли фосфата до 50% не приводит к заметному точечному контактированию оолитов между собой. Основная масса оолитов имеет простое строение с размерами 0.04–0.3 мм. Если цементирующий материал представлен карбонатной массой от мелкозернистой до крипнокристаллической структуры, то теплопроводность таких фосфоросодержащих отходов можно рассчитать по модели трехкомпонентной смеси с замкнутыми включениями или переходом к бинарным системам по самосогласованному методу.

Дальнейшее увеличение объемной доли оолитов в фосфоросодержащих отходах до 60% приводит к точечному контактированию включений с последующим смыканием изолированных объемов. При этом структура подобна структуре с взаимопроникающими компонентами и ее можно отнести к переходной. К такому типу структур также относятся карбонатно-кремнистые и частично высококачественные фосфориты. Поскольку структура с взаимопроникающими компонентами по отношению к свойствам компонент инвариантна, для ориентировочных расчетов допускается иметь объемную долю фосфата 70%, т.е. $P_2O_5 - 29\%$. Среднее арифметическое между адиабатным и изотермическим дроблением дает возможность определить эффективную теплопроводность на основе комбинированного подхода для любых соотношений теплопроводностей компонент.

В фосфоритах с большой концентрацией фосфата наблюдается следующее:

- появляется фосфат-цемент и последующее слияние оолитов фосфатного вещества;
- нарушается непрерывность доминирующей компоненты (цемента);
- происходит переход структуры от взаимопроникающих компонент к изолированным включениям и смена доминирующей компоненты.

К этому типу структуры относятся почти все высококачественные фосфориты.

Для оценки коэффициента теплопроводности отходов переработки апатит-нефелиновых месторождений следует использовать модель трехкомпонентной смеси, где цементом служит фосфатное вещество.

Использование моделей для расчета теплопроводности в широком диапазоне температур переработки отходов возможно лишь при известных значениях коэффициентов теплопроводности их составляющих. К ним необходимо отнести фосфатизированные кремни, кремнитные, высококачественные и мономинеральные фосфориты. Моделирование теплопроводности высококарбонатных фосфоритов требует дальнейших исследований из-за изменения структуры реагирующего материала и соотношения компонент в результате реакций диссоциации доломита при нагревании.

Следует учитывать перестройку структуры во взаимопроникающую с изолированными включениями, с появлением контактов между вкраплениями и последующим ростом поперечного сечения в диапазоне изменения объемной доли вкраплений 0.125–0.5, что характерно для хаотических систем.

Так, например, теплопроводность в бинарной системе, для случая когда один компонент нахо-

дится в окружении другого компонента, с изолированными включениями описывается уравнением

$$\bar{\lambda}_i = \lambda_i \left[1 - v_i^* / \left((1 - \lambda_i / \lambda_i^*)^{-1} - (1 + v_i^*) (1 - \sqrt[3]{v_i^*}) (1 - \sqrt[3]{v_i^*}^{-1}) \right) \right], \quad (4)$$

где $\bar{\lambda}_i$ – теплопроводность двухкомпонентной системы с учетом принятой структуры; λ_i – теплопроводность i -го компонента с концентрацией v_i ; λ_i^* – теплопроводность второго компонента окружения с концентрацией $v_i^* = 1 - v_i$.

Для взаимопроникающих компонент при комбинированном дроблении зависимость более сложная:

$$\bar{\lambda}_i = \lambda_i \left[\frac{c^2 + (\lambda_i / \lambda_i^*) c (1 - c)}{(\lambda_i / \lambda_i^*) c (1 - c) + 1 - c + c^2} + (\lambda_i / \lambda_i^*) \frac{c (1 - c) + (\lambda_i / \lambda_i^*) (1 - c)^2}{c (1 - c) + (\lambda_i / \lambda_i^*) (1 - c + c^2)} \right], \quad (5)$$

где c – положительный корень кубического уравнения $2c^3 - 3c^2 + 1 = v_i^*$, $c = 0.5 + A \cos(\varphi/3)$, $270^\circ < \varphi < 360^\circ$; при $0 \leq v_i^* \leq 0.5$, $A = -1$ и $\varphi = \arccos(1 - 2v_i^*)$; при $0.5 < v_i^* \leq 1$, $A = 1$ и $\varphi = \arccos(2v_i^* - 1)$.

В свою очередь для реагирующих включений, представляющих собой крупно- или среднекристаллические зерна карбоната размером 0.001–0.2 мм, объемная доля исходного непрореагировавшего материала (доломита) при нагреве будет изменяться с появлением продуктов реакции смеси CaO и MgO или ортосиликатов кальция и магния в кремнисто-карбонатных рудах.

Объемная доля непрореагировавшего карбоната v_{c0} может быть выражена через степень реагирования η : $v_{c0} = [1 + (\eta / (1 - \eta)) (\rho_0 / \rho_r)]^{-1}$, где ρ_0 , ρ_r – плотности исходного и обожженного материала соответственно. При этом реагирующий материал будет представлять собой матричную структуру изолированных включений непрореагировавшего материала в цементе, состоящем из продуктов реакции. Теплопроводность такого типа системы следует определять с использованием метода расчета многокомпонентной системы путем последовательного сведения к двухкомпонентной, таким образом можно рассчитать теплопроводность композиционного материала с реагирующими включениями. Следовательно, для описания теплопроводности отходов различных апатит-нефелиновых месторождений необходимо иметь зависимость теплопроводности компо-

нент, составляющих композит, химический или минералогический состав и результаты по реакции диссоциации карбонатов.

Теплопроводность отдельных составляющих в структуре отходов апатит-нефелиновых месторождений получена по экспериментальным данным для широкого диапазона минералогического состава отходов методом нелинейных наименьших квадратов. Вычислены коэффициенты теплопроводности вещества, кремнезема, непрореагировавшего и обожженного карбоната. Зависимость теплопроводности компонент от температуры хорошо описывается многочленами второй степени в диапазоне 400–1300 К $\lambda = \sum b_i T^{i-1}$.

Из-за сложности экспериментального определения теплопроводности в зоне химического реагирования для обработки использовались данные экстраполяции для образцов с непрореагировавшими карбонатными включениями.

Удельную теплоемкость композиционного материала c_p можно определить по аддитивной модели $c_p = \sum m_i c_{pi}$, где m_i – массовая доля компонента; c_{pi} – удельные теплоемкости компонент.

Коэффициенты для описания теплоемкости компонент получены путем обработки экспериментальных значений различных типов фосфоросодержащих отходов апатит-нефелиновых руд с различным компонентным составом и с учетом модификационных превращений α - в β -кварц (табл. 4).

Многочлен имеет вид $c_p = \sum s_i T^{i-1}$.

Полученные значения теплоемкости всех составляющих практически совпадают с известными зависимостями в пределах 14%. Что касается теплоемкости доломита после термического разложения, то ее значения значительно отличаются от теплоемкости CaO и MgO, поскольку эти окислы вступают в твердофазные реакции с кварцем SiO₂, образуя силикатные расплавы.

Расчет теплоемкости фосфоритов в зоне температур реакций декарбонизации можно проводить полагая, что доля прореагировавшего компонента пропорциональна степени реагирования реакции диссоциации карбонатов:

$$\rho c_p(T, \eta) = \rho c_{p0}(T) + (\rho c_{p0}(T) - \rho c_{pr}(T))(1 - \eta), \quad (6)$$

где ρc_{p0} , ρc_{pr} – объемные теплоемкости исходного и обожженного материала.

Теплоемкость исходного материала в зоне реагирования определялась экстраполяцией экспериментальных значений.

Эффективную теплоемкость ρc_{pe} в зоне термического разложения MgCO₃ и CaCO₃ можно вы-

числить из теплового баланса, где учтено влияние реагирующих компонент:

$$\rho c_{pe} (dT/d\tau) = \rho c_p (dT/d\tau) + \sum_{i=1}^2 Q_i \rho_i (d\eta_i/d\tau). \quad (7)$$

Здесь $Q_1 = 1.21$ Дж/моль и $Q_2 = 1.74105$ Дж/моль – тепловые эффекты реакций диссоциации карбонатов CaCO₃ и MgCO₃ соответственно.

Плотность фосфоритов, как композиционных материалов, рассчитывалась по формуле

$$\rho = \sum v_i \rho_i, \quad (8)$$

где ρ_i – плотность i -го компонента.

Для отдельных составляющих можно найти значения плотностей на основе анализа плотности от различного содержания компонент. Зависимость плотности образцов от содержания P₂O₅ носит явный характер для карбонатных, карбонатно-кремнистых и высококачественных фосфоритов, асимптотически приближаясь к значению плотности 3.1 г/см³ для субмономерального фосфорита (табл. 3).

Наименьшая плотность фосфатизированных сланцев объясняется различной пористостью образцов.

Анализ этих данных позволяет выделить плотности минералов или основных компонент, содержащихся в отвалах горно-обогачительных комбинатов из отходов апатит-нефелиновых руд:

Вещество	ρ , г/см ³
Оолиты, цемент	3.1
Доломит, кальцит	2.8–2.85
Кремнезём	2.5–2.6

В общем случае корреляция свойств от содержания P₂O₅ и минерального состава вполне определена и подтверждает правильность поиска закономерностей для обобщенного описания. Таким образом, по химическому составу отходов (процентному содержанию простейших окислов, среди которых P₂O₅, CaO, MgO, CO₂, SiO₂, Al₂O₃, F, K₂O, Na₂O, Fe₂O₃, FeO) можно, используя основные связи между массовыми долями минеральных составляющих и химическим составом, определить основные ТФХ.

Эффективная теплопроводность многокомпонентных систем рассчитывалась на основе самосогласованного метода, т.е. многократного использования бинарных структур с применением следующего алгоритма.

1. Исходные данные: химический состав отходов обогащения руд, структура (содержание фосфатного, карбонатного и кремнистого вещества), температура, степень реагирования.

Таблица 4. Коэффициенты многочленов для описания теплопроводности, Вт/(м К), и удельной теплоемкости, кДж/(кг К), компонентов, определяющих ТФХ фосфоросодержащих отходов апатит-нефелиновых месторождений

Компоненты	Теплопроводность			Удельная теплоемкость		
	b_1	$b_2 \times 10^2$	$b_3 \times 10^5$	s_1	$s_2 \times 10^2$	$s_3 \times 10^6$
Фосфатное вещество	2.82	-0.3	0.14	0.788	0.061	-0.25
Кремнистая составляющая	12.6	-1.75	0.95	0.394	0.150	-0.4 ¹
Карбонаты до реакции	7.85	-1.08	0.49	4.150	-0.572	2.7 ²
Обоженный карбонат	1.52	-0.13	0.049	0.410	-0.155	-0.4
				1.943	-1.580	0.98

¹ До температуры модификационного превращения α - в β -кварц ($T = 850$ К). ² Для температур выше 850 К.

2. Определение минерального состава, т.е. массовых долей основных компонент.

3. Расчет плотности i -х компонент при заданной температуре $\rho_i(T)$.

4. Определение объема отдельных компонент и объемных долей.

5. Цикл по ($i = 1, \dots, n$)-компонентам. Пересчет объемных долей для окружения i -го компонента.

6. Расчет теплопроводности среды, окружающей i -й компонент, по слоистой модели со структурой компонент, параллельной потоку тепла.

Определение структуры композиции, где i -й компонент находится в смеси из остальных $n - 1$ по соответствующему критерию, и присвоение признака данной структуры (1 – слоистая со слоями, параллельными тепловому потоку; 2 – слоистая со слоями, перпендикулярными тепловому потоку; 3 – с взаимопроникающими компонентами; 4 – с изолированными включениями, когда теплопроводность вкраплений меньше теплопроводности окружения; 5 – с изолированными включениями, когда теплопроводность включения больше теплопроводности окружения).

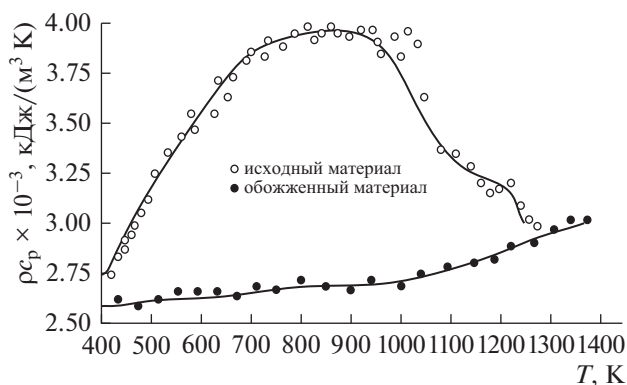


Рис. 1. Экспериментальные значения теплоемкости отходов из отвалов апатит-нефелиновых руд и рассчитанные на основе обобщенных зависимостей.

7. Определение теплопроводности двухкомпонентной системы $\bar{\lambda}_i$ с учетом принятой структуры, состоящей из i -го компонента с теплопроводностью λ_i и концентрацией v_i и второго компонента-окружения с теплопроводностью λ_i^* и концентрацией $v_i^* = 1 - v_i$.

8. Определение теплопроводности как композитной системы:

$$\lambda_f = \sum_{i=1}^n \lambda_i (\bar{\lambda}_i - \lambda_i^*) / (\lambda_i - \lambda_i^*)$$

9. Конец цикла.

10. Вывод результатов.

Особый интерес для анализа представляет область температур химического реагирования. На рис. 1 и 2 представлены результаты расчета тепло-

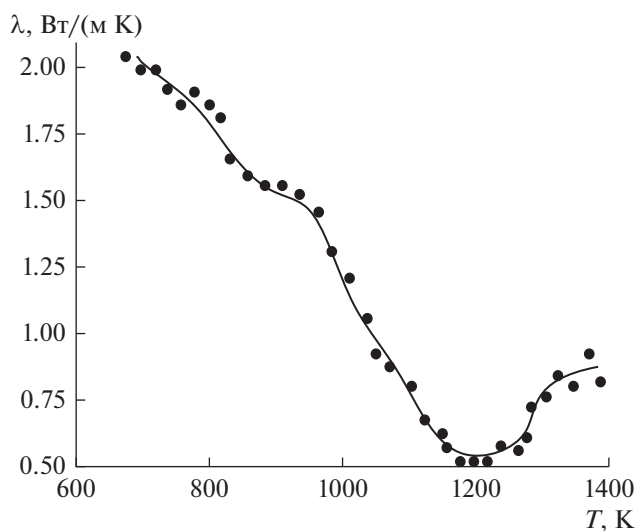


Рис. 2. Экспериментальные значения теплопроводности отходов из отвалов апатит-нефелиновых руд и рассчитанные на основе обобщенных зависимостей в температурном диапазоне эндотермической реакции диссоциации карбонатов.

ИНДЕКСЫ

проводности и теплоемкости материалов из отходов горно-обогатительных комбинатов апатит-нефелиновых месторождений по разработанному алгоритму в диапазоне температур, включающих высокотемпературную зону диссоциации карбонатных составляющих.

Необходимо отметить достаточную для практического использования при переработке таких отходов сопоставимость расчетных и экспериментальных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование разработанных моделей в композиционных структурах оказывается вполне удовлетворительным и позволяет учесть реагирование отдельных компонентов. Особое внимание необходимо уделять корректному определению структуры отходов апатит-нефелиновых руд, так как это существенно влияет на результаты второго этапа в оценке теплопроводности многокомпонентных систем.

Научно обоснован подход к обобщению теплофизических свойств для широкого спектра отходов горно-обогатительных комбинатов. Очевидно он будет справедлив и для химико-технологических характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-24094 МК).

ОБОЗНАЧЕНИЯ

a	температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$
c_p	удельная массовая теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг К})$
c_v	объемная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \text{К})$
l_f	длина свободного пробега фононов, м
m	массовая доля компонента в многокомпонентной системе
R	универсальная газовая постоянная, равная $8.31446261815324 \text{ Дж}/(\text{моль К})$
T	температура, К
v	концентрация компонента в многокомпонентной системе
W_f	скорость распространения волны, $\text{м}/\text{с}$
η	степень реагирования в реакции диссоциации карбонатов
θ_D	температура Дебая, К
λ	теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м К})$
ρ	плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$
τ	время, с
τ_f	время релаксации фононов, с

i порядковый номер компонента в многокомпонентной системе

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bobkov V.I., Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P. Study of the Thermal Characteristics of Phosphate Raw Materials in the Annealing Temperature Range // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2017. V. 51. № 3. 3. 307. [Бобков В.И., Борисов В.В., Дли М.И., Мешалкин В.П. Исследование тепловых характеристик фосфатного сырья в диапазоне температур обжига // *Теор. осн. хим. технол.* 2017. Т. 51. № 3. С. 295.]
2. Леонтьев Л.И. Физико-химические особенности комплексной переработки железо-содержащих руд и техногенных отходов // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Екатеринбург, 2016. С. 92.
3. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M. Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2015. V. 119. № 1. P. 265.
4. Panchenko S.V., Shirokikh T.V. Thermophysical processes in burden zone of submerged arc furnaces // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2014. V. 48. № 1. P. 77. [Панченко С.В., Широких Т.В. Теплофизические процессы в шихтовой зоне электротермических рудовосстановительных реакторов // *Теор. осн. хим. технол.* 2014. Т. 48. № 1. С. 83.]
5. Luis P., Van der Bruggen B. Exergy analysis of energy-intensive production processes: advancing towards a sustainable chemical industry // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2014. V. 89. № 9. P. 1288.
6. Bobkov V.I., Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P. Intensive Technologies for Drying a Lump Material in a Dense Bed // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2017. V. 51. № 1. P. 72. [Бобков В.И., Борисов В.В., Дли М.И., Мешалкин В.П. Интенсивные технологии сушки кускового материала в плотном слое // *Теор. осн. хим. технол.* 2017. Т. 51. № 1. С. 72.]
7. Meshalkin V.P., Bobkov V.I., Dli M.I., Khodchenko S.M. Computer-aided modeling of the chemical process of drying of a moving dense multilayer mass of phosphorite pellets // *Dokl. Chem.* 2017. V. 475. № 2. P. 188. [Мешалкин В.П., Бобков В.И., Дли М.И., Ходченко С.М. Компьютерное моделирование химико-технологического процесса сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей // *Докл. Акад. наук.* 2017. Т. 475. № 4. С. 410.]
8. Meshalkin V.P., Bobkov V.I., Dli M.I., Khodchenko S.M. Computer modeling of the chemical-power engineering process of roasting of a moving multilayer mass of phosphorite pellets // *Dokl. Chem.* 2017. V. 477. № 2. P. 282. [Мешалкин В.П., Бобков В.И., Дли М.И., Ходченко С.М. Компьютерное моделирование химико-энерготехнологического процесса обжига движущейся многослойной массы фосфоритовых окатышей // *Докл. Акад. наук.* 2017. Т. 477. № 5. С. 559.]
9. Meshalkin V.P., Bobkov V.I., Dli M.I., Khodchenko S.M. Optimizing the energy efficiency of the chemical and

- energy engineering process of drying of a moving dense multilayer mass of phosphorite pellets // Dokl. Chem. 2017. V. 477. № 2. P. 286. [Мешалкин В.П., Бобков В.И., Дли М.И., Ходченко С.М. Оптимизация энергоэффективности химико-энерготехнологического процесса сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей // Докл. Акад. наук. 2017. Т. 477. № 6. С. 667.]
10. Буткарев А.А., Буткарев А.П., Ащеулов В.Н., Жомирук П.А., Лазебная Ю.П. Оптимизация работы тракта эксгаустера обжиговой машины ОК-108 АО ССПО для увеличения производства окатышей // Сталь. 2015. № 3. С. 12.
 11. Зайнуллин Л.А., Дружинин Г.М., Буткарев А.А. Инновационные разработки ОАО ВНИИМТ для энергосбережения и экологии в металлургии // Черн. металл. 2014. № 7 (1375). С. 79.
 12. Берман Р. Теплопроводность твердых тел. М.: Мир, 1979. [Berman R. Thermal Conduction in Solids (Oxford Studies in Physics). Oxford: Oxford Univ. Press, 1976.]
 13. Рейсленд Дж. Физика фононов. М.: Мир, 1975. [Reissland J.A. The Physics of Phonons. New York: Wiley, 1973.]
 14. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. М.: Мир, 1968. [Misenard A. Conductivite thermique des solides, liquides, gaz et de leurs melanges. Paris: Editions eyrolle, 1965.]
 15. Дучков А.Д., Соколова К.С. Геотермические исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1974.
 16. Леванов А.В., Антипенко Э.Е. Определение термодинамических свойств статистическими методами. Реальные газы. Жидкости. Твердые тела. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2006.
 17. Melamid S.G., Yur'ev V.P. Oxidation of iron ore at moderate and high temperatures // Steel Transl. 2016. V. 46. № 6. P. 384.
 18. Акбердин А.А., Ким А.С., Султангазиев Р.Б. Планирование численного и физического эксперимента при моделировании технологических процессов // Изв. высш. учебн. завед. Черн. металл. 2018. Т. 61. № 9. С. 737.
 19. Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девярых Е.А., Девярых Т.О., Спиринов Н.А. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 2 // Изв. высш. учебн. завед. Черн. металл. 2018. Т. 60. № 1. С. 19.
 20. Bokovikov V.A., Bragin V.V., Shvydkii V.S. Role of the thermal-inertia zone in conveyer roasting machines // Steel Transl. 2014. V. 44. № 8. P. 595.
 21. Bragin V.V., Bokovikov V.A., Naidich M.I., Gruzdev A.I., Shvydkii V.S. Relation between the productivity and fuel consumption in roasting machines // Steel Transl. 2014. V. 44. № 8. P. 590.
 22. Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г., Спиринов Н.А., Лавров В.В. Математическая модель процесса обжига рудугольных окатышей на конвейерной машине // Изв. высш. учебн. завед. Черн. металл. 2018. Т. 60. № 4. С. 329.
 23. Новичихин А.В., Шорохова А.В. Процедуры управления поэтапной переработкой железорудных отходов горнопромышленных районов // Изв. высш. учебн. завед. Черн. металл. 2018. Т. 60. № 7. С. 565.
 24. Леонтьев Л.И., Григорович К.В., Костина М.В. Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. Часть 1 // Изв. высш. учебн. завед. Черн. металл. 2018. Т. 61. № 1. С. 11.
 25. Гуринов И.А., Лавров В.В., Спиринов Н.А., Никитин А.Г. Веб-технологии построения информационно-моделирующих систем технологических процессов в металлургии // Изв. высш. учебн. завед. Черн. металл. 2017. Т. 60. № 7. С. 573.