

СТАТЬИ

УДК 66.021.4

**ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ФОСФОРИТОВОГО АГЛОМЕРАТА**

**Бобков В.И., Орехов В.А.**

*Смоленский филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
Смоленск, e-mail: vovabobkoff@mail.ru*

В статье рассмотрены вопросы экспериментального определения теплофизических свойств агломерата рудного фосфоритового сырья, учитывающего технологические особенности функционирования промышленных агломерационных машин. Представлена методика проведения экспериментов для исследования теплопроводности и объемной теплоемкости агломерата при высоких температурах, в диапазонах действующих агломерационных машин. Установлено, что для исследования коэффициентов теплопроводности и температуропроводности агломератов фосфатного рудного сырья применим метод регулярного режима 3-го рода, позволяющий получать комплекс достоверных данных о теплофизических свойствах за один эксперимент при монотонном нагреве образцов. Он обеспечивает достаточную для практических целей точность получения информативных сигналов – амплитуд гармонических колебаний или фазовых сдвигов температуры в различных точках образца – не связано с условиями нагрева. Это качество представленной методики особенно важно при исследовании свойств реагирующих рудных материалов и материалов с изменяющейся структурой, когда скорость нагрева влияет на интенсивность и температурный диапазон термически активируемых процессов. Научно обосновано, что теплопроводность входящих в фосфатную руду компонентов выше, чем у полученного из нее агломерата. Минералогический состав и порозность фосфоритовой рудной мелочи существенно влияет на объемную теплоемкость агломератов. Порозность рудного материала в меньшей степени зависит от химического состава фосфоритов. Различия в коэффициентах теплопроводности снижаются при повышении температуры.

**Ключевые слова:** рудное фосфатное сырье, теплоемкость, теплопроводность, температура, порозность, агломерат, структура, нагрев

**PECULIARITIES PROCEDURE FOR DETERMINATION  
OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES PHOSPHORITE AGGLOMERATE**

**Bobkov V.I., Orekhov V.A.**

*Smolensk branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute,  
Smolensk, e-mail: vovabobkoff@mail.ru*

The article deals with issues of experimental determination of thermophysical properties of agglomerate of ore phosphorite raw material, which takes into account technological peculiarities of operation of industrial agglomeration machines. The procedure for conducting experiments to study the thermal conductivity and volumetric heat capacity of the agglomerate at high temperatures in the ranges of operating agglomeration machines is presented. It was established that to study the thermal conductivity and thermal conductivity coefficients of agglomerates of phosphorus-containing ore raw materials, a method of regular mode of the 3rd kind is used, which allows obtaining a complex of reliable data on thermophysical properties in one experiment with monotonous heating of samples. It provides sufficient accuracy for practical purposes. This circumstance is especially important in the study of natural ore rocks characterized by significant heterogeneities in structure and composition, when it is impossible to ensure absolute identity of samples. When using the irregularity compensation scheme, it has been found that the acquisition of informative signals – harmonic amplitude or temperature phase shift at various points in the sample – is not related to the heating conditions. This quality of the presented procedure is especially important in the study of the properties of reactive ore materials and materials with a changing structure, when the heating rate affects the intensity and temperature range of thermally activated processes. It is scientifically justified that the thermal conductivity of the components included in the phosphorus-containing ore is higher than that of the agglomerate obtained from it. The mineralogical composition and porosity of phosphorite ore fines significantly affects the volumetric heat capacity of agglomerates. The porosity of the ore material depends less on the chemical composition of phosphorites. Differences in heat conduction coefficients decrease as the temperature increases.

**Keywords:** ore phosphate raw materials, heat capacity, thermal conductivity, temperature, porosity, agglomerate, structure, heating

В соответствии с существующей технологической схемой получения и переработки агломерированного фосфатного сырья, спеченный фосфорит охлаждается, измельчается и затем поступает в рудотермическую печь, где вновь подвергается нагреву

в верхней зоне [1, 2]. Очевидно, что проведение технологических расчетов аппаратов спекания и охлаждения, а также анализ процессов теплообмена в верхней зоне фосфорной рудотермической печи невозможен без наличия достоверных данных по тепло-

физическим свойствам агломератов [3, 4]. Однако, несмотря на очевидную необходимость, в литературе скудно представлены данные по теплопроводности и температуропроводности агломератов. С другой стороны, поскольку процесс спекания позволяет активно воздействовать на свойства получаемого агломерата путем подбора состава и крупности шихтовых материалов, режимом спекания и т.п., существует возможность фиксирования у полупродукта не только удовлетворительных прочностных свойств, но и наиболее приемлемых для последующей переработки теплофизических характеристик [5, 6].

Цель настоящего исследования – разработка методики проведения теплофизических исследований на стадиях формирования состава шихты и режимов обжига, а также контроля качества полупродукта – аглоспека фосфоритового рудного сырья, полученного в промышленных условиях.

#### Материалы и методы исследования

Для определения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности агломератов фосфатного рудного сырья использовался метод регулярного режима 3-го рода [7, 8]. Этот метод позволяет получить комплекс теплофизических свойств за один эксперимент при монотонном нагреве образца и обеспечивает достаточную для практических целей точность результатов [9, 10]. Это последнее обстоятельство особенно важно при исследовании природных рудных пород, характеризующихся существенными не-однородностями структуры и состава, когда невозможно обеспечить абсолютную идентичность образцов [11]. Кроме того, при использовании схемы компенсации иррегулярности получение информативных сигналов – амплитуд гармонических колебаний или фазовых сдвигов температуры в различных точках образца – не связано с условиями нагрева.

Это качество метода особенно важно при исследовании свойств реагирующих материалов и материалов с изменяющейся структурой, когда скорость нагрева влияет на интенсивность и температурный диапазон термически активируемых процессов [12].

Сущность метода состоит в изучении распространения температурных колебаний в исследуемом образце. Метод плоских температурных волн основан на решении задачи теплопроводности при гармоническом изменении теплового потока, создаваемого плоским нагревателем, помещенным в исследуемую среду [13]. При линейных граничных условиях закон затухания гармонических колебаний температуры в одно-

родной среде имеет следующий вид:

$$\Theta(x) = \Theta_0 \exp\left(\sqrt{\frac{\pi}{aT}}\right), \quad (1)$$

где  $\Theta_0$ ,  $\Theta(x)$  – амплитуда колебаний температуры на нагревателе и на удалении  $x$  в исследуемом образце,  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $T$  – период гармонических колебаний,  $T = 2\pi/\omega$ ,  $\omega$  – частота периодических колебаний теплового потока.

Исходя из (1), температуропроводность исследуемой среды может быть определена по амплитудам колебаний температуры в двух точках, расположенных на различном удалении от нагревателя:

$$a = \frac{\Delta x^2 \omega}{2 \ln^2(\Theta_1/\Theta_2)},$$

где  $\Delta x$  – расстояние между термодатчиками,  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  – амплитуда колебаний температуры в местах установки термических преобразователей.

Теплопроводность среды определяется из соотношения между гармонической составляющей удельного теплового потока  $q$ , создаваемого электрическим нагревателем и амплитудой гармонических колебаний температуры:  $q/\Theta_0 = \sqrt{\lambda \rho c_p \omega}$ .

Если пренебречь теплоемкостью нагревателя, то выражение для определения теплопроводности примет вид

$$\lambda = \frac{Q}{2F\Theta_0} \sqrt{\frac{a}{\omega}}, \quad (2)$$

где  $F$  – площадь нагревателя.

Для создания гармонических колебаний мощности использовался ток промышленной частоты, промодулированный инфранизкочастотным сигналом. Эффективное значение тока задавалось по следующей зависимости:

$$I = I_0 + I \sin \omega t,$$

где  $I_0$  – эффективное значение постоянной составляющей тока,  $I$  – амплитуда переменной составляющей тока.

Поскольку амплитуда температурных колебаний невелика, можно пренебречь температурной зависимостью сопротивления электрического нагревателя. Тогда при выполнении условия  $I_0 \gg I$  амплитудное значение теплового потока может быть получено из выражения  $Q = 2I_0IR$ , где  $R$  – сопротивление нагревателя при средней за период колебания температуре.

Окончательный вид выражения (2) для расчета коэффициента теплопроводности следующий:

$$\lambda = \frac{I_0 IR}{2F\Theta_0} \sqrt{\frac{a}{\omega}}$$

Относительная ошибка, обусловленная пренебрежением теплоемкостью нагревателя, не будет превышать заданного значения, если выполняется условие

$$\frac{c_H}{F} = 2\Delta\lambda \sqrt{\frac{2}{a\omega}}$$

где  $c_H$  – полная теплоемкость нагревателя.

Анализ структуры фосфатных агломератов показывает, что характерный размер элементарной ячейки материала варьируется в пределах 0,5–1,5 мм.

Очевидно, для того, чтобы образец мог рассматриваться как однородная среда, расстояние между термодатчиками должно существенно превышать характерный размер элементарной ячейки. Однако это расстояние не должно быть велико, так как увеличение размеров образца существенно ухудшает динамические возможности метода и способствует повышению дисперсии случайных погрешностей [14]. В настоящей работе расстояние между термодатчиками выбиралось в пределах 7–10 мм.

### Результаты исследования и их обсуждение

В работе определялись теплофизические свойства (теплопроводность и те-

плоемкость) восьми образцов фосфоритовых агломератов, различающихся по химическому составу и порозности (●, ○, ▲, △, ■, □, ◆, ◇, – образцы 1–8 соответственно). На рис. 1 приведены результаты экспериментального определения коэффициента теплопроводности исследуемых образцов от температуры. Результаты исследований показывают, что абсолютные значения коэффициента теплопроводности агломератов сравнительно невелики [15].

Теплопроводность агломератов в среднем в 5–6 раз ниже, чем теплопроводность исходных материалов. Это, по-видимому, обусловлено в основном двумя факторами: снижением теплопроводности зерен в результате их дегидратации и декарбонизации в процессе нагрева, а также, как следствие, образования в процессе спекания высокопористой структуры.

Значительное влияние пористости агломератов на коэффициент теплопроводности подтверждается результатами исследований.

Температурные зависимости объемной теплоемкости агломератов фосфатного рудного сырья приведены на рис. 2.

Результаты исследований показывают, что абсолютные значения объемной теплоемкости определяются в основном соотношением массовых долей компонентов, представляющих группы  $P_2O_5$ ,  $SiO_2$  и карбонатов, а также зависят от кажущейся плотности агломератов.

На рис. 3 приведены зависимости коэффициентов теплопроводности от плотности исследуемых образцов для двух температурных сечений 600 °С и 1000 °С.

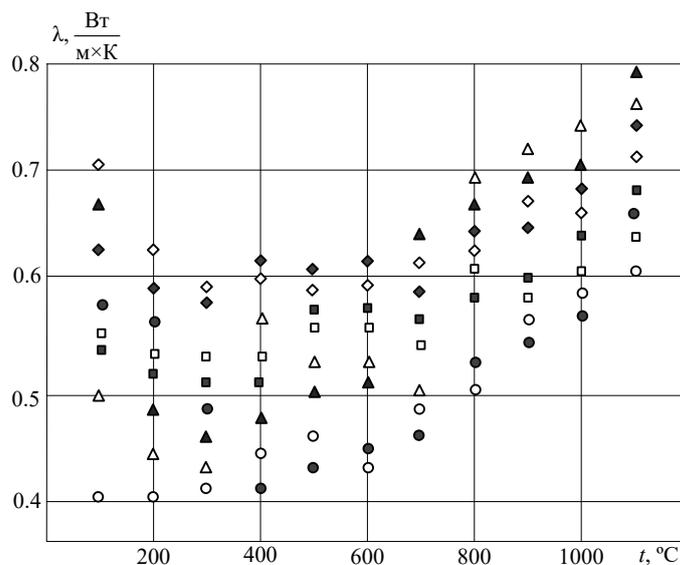


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности агломерата фосфоритового рудного сырья, образцы 1–8

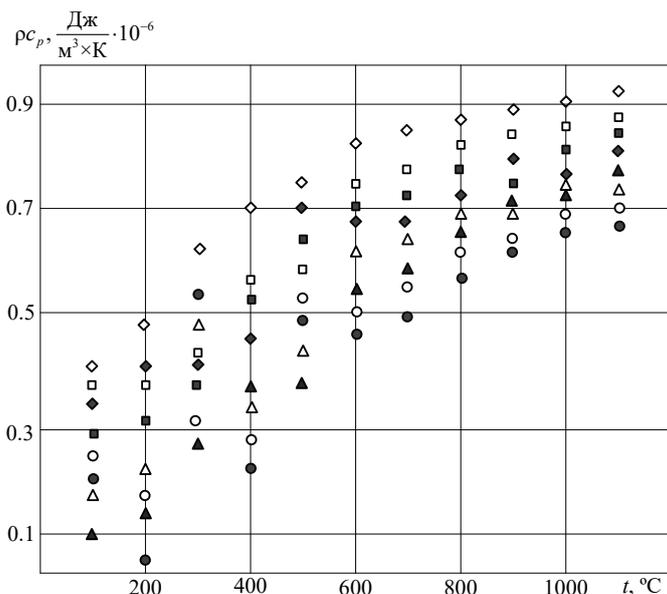


Рис. 2. Температурная зависимость объемной теплоемкости агломерата фосфоритового рудного сырья, образцы 1–8

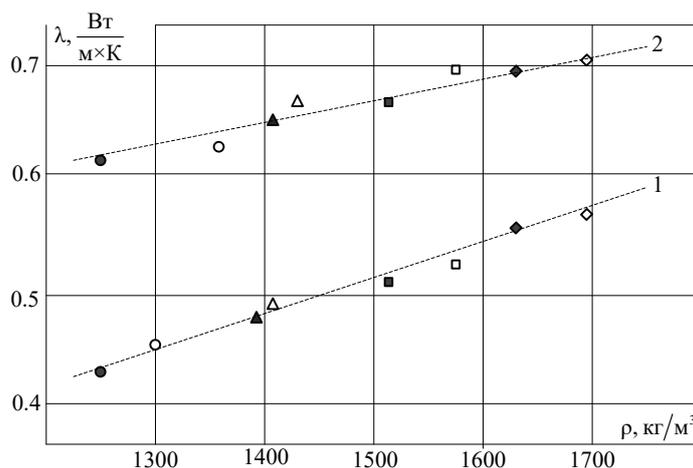


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности агломерата фосфоритового рудного сырья, образцы 1–8, для двух температурных сечений 1 – 600 °С и 2 – 1000 °С

### Заключение

Результаты исследований позволяют сделать следующие основные научно обоснованные выводы.

1. Теплопроводность агломератов из фосфоритовой рудной мелочи значительно ниже, чем теплопроводность входящих в них компонентов.

2. Абсолютные значения коэффициентов теплопроводности агломератов определяются в основном: порозностью материалов и в значительно меньшей степени зависят от химического состава, причем различия в коэффициентах теплопроводности снижаются по мере повышения температуры.

3. Объемная теплоемкость агломератов из фосфоритовой рудной мелочи определяется их порозностью и минеральным составом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00335, <https://rscf.ru/project/22-11-00335>.

### Список литературы

1. Бобков В.И., Мищенко М.Н. Исследование теплофизических характеристик окомкованного фосфатного материала // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 7–1. С. 26–29.
2. Пучков А.Ю., Лобанева Е.И., Култыгин О.П. Алгоритм прогнозирования параметров системы переработки отходов апатит-нефелиновых руд // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 1.

3. Леонтьев Л.И., Григорович К.В., Костина М.В. Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. Часть 1 // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 1. С. 11–22.
4. Курилин С.П., Соколов А.М., Прокимов Н.Н. Компьютерная программа для моделирования показателей технического состояния электромеханических систем // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 2. С. 105–119.
5. Новичихин А.В., Шорохова А.В. Процедуры управления поэтапной переработкой железорудных отходов горнопромышленных районов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 60. № 7. С. 565–572.
6. Бобков В.И. Энергосбережение в технологии сушки материала в плотном слое на основе интенсификации тепло-массообмена // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 12–4. С. 585–589.
7. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Федина В.В. Определение комкуемости железорудной шихты с целью прогнозирования прочностных свойств окатышей // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 8. С. 53–57.
8. Ильин И.В., Левина А.И., Калязина С.Е. Function-oriented approach to mining enterprise automation // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 2. С. 5–19.
9. Tian, Y., Qin, G., Zhang, Y., Zhao, L., Yang, T. Experimental research on pellet production with boron-containing concentrate. Characterization of Minerals, Metals, and Materials. 2020. P. 91–102.
10. Бобков В.И., Дли М.И., Панченко С.В. Обобщенная структурно-функциональная модель инжиниринга и управления экологически безопасной переработкой отходов горно-обогатительных комбинатов апатит-нефелиновых руд // Успехи современного естествознания. 2019. № 9. С. 48–52.
11. Matkarimov S.T., Berdiyarov B.T., Yusupkhodjaev A.A. Technological parameters of the process of producing metallized iron concentrates from poor raw material. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. № 8(11). P. 600–603.
12. Kossov A. Effect of thermal inertia-induced distortions of DSC data on the correctness of the kinetics evaluated. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021. Т. 143. № 1. С. 599–608.
13. Kavchenkov V.P., Kavchenkova E.V., Chernenkov I.D. Modeling of the relationship between the earth population growth and the electric energy production processes. Journal of Applied Informatics. 2021. Vol. 16. No. 4 (94). P. 110–121.
14. Dli M.I., Vlasova E.A., Sokolov A.M., Morgunova E.V. Creation of a chemical-technological system digital twin using the Python language. Journal of Applied Informatics. 2021. Vol. 16. No. 1 (91). P. 22–31.
15. Бобков В.И. Оптимизация химико-технологического процесса сушки в стационарном режиме многослойной массы фосфоритовых окатышей по критерию энергоресурсоэффективности // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 5. С. 25–29.