

УДК 62.932.2

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ С ДОБАВКОЙ ПИРОЛИЗНОГО ОСТАТКА ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ

О.Б. КОЛИБАБА, Д.А. ДОЛИНИН, Р.Н. ГАБИТОВ, М.О. ШАВИТОВА  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Перспективным экологически безопасным методом переработки твердых коммунальных отходов является пиролиз. Пиролиз позволяет получить комбинацию твердых, жидких и газообразных продуктов в различных пропорциях за счет изменения рабочих параметров процесса. Перспективным направлением использования твердых продуктов пиролиза является производство различных материалов для промышленного, гражданского и дорожного строительства. Известны способы получения на его основе цемента, бетона и пеностекла с улучшенными свойствами. В современных строительных технологиях широко используются керамические материалы, для производства которых требуются различные дорогостоящие добавки, такие как кварцевый песок, доломит, каменный уголь, горные породы угледобычи и др. В связи с этим актуальным представляется использование остатка пиролиза твердых коммунальных отходов в качестве «бесплатной» структурообразующей добавки в технологии производства керамического материала. Для определения области применения этого материала и выполнения последующих теплотехнических расчетов требуется знание его теплофизических характеристик.

**Материалы и методы.** Для определения теплофизических характеристик керамического материала использован экспериментальный метод цилиндрического слоя и расчетно-экспериментальный метод обратной задачи теплопроводности.

**Результаты.** В результате экспериментальных исследований теплофизических свойств нового керамического материала получены зависимости средней удельной теплоемкости и коэффициента температуропроводности керамического материала от температуры в диапазоне 30–90 °С, а коэффициента теплопроводности – в диапазоне 30–500 °С, позволяющие выполнять расчеты тепловых процессов, протекающих в материале при его промышленном использовании. Установлено, что коэффициент теплопроводности материала изменяется в пределах 0,3–0,65 Вт/м·К, коэффициент температуропроводности –  $(1,8–2,3) \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, а средняя удельная теплоемкость – 780–1300 Дж/кг·К, что сопоставимо с теплофизическими характеристиками известных керамических материалов.

**Выводы.** Целесообразно использовать пиролизный остаток твердых коммунальных отходов в качестве бесплатного сырья вместо дорогостоящих добавок для получения керамического материала. Рекомендуется использовать новый керамический материал в технологиях производства строительных изделий различного назначения.

**Ключевые слова:** пиролиз, твердые коммунальные отходы, твердый углеродистый остаток, теплофизические свойства, керамический материал

## THE STUDY OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF CERAMICS WITH THE ADDITION OF THE PYROLYSIS RESIDUE OF SOLID WASTE

O.B. KOLIBABA, D.A. DOLININ, R.N. GABITOV, M.O. SHAVITOVA  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

### Abstract

**Background.** A promising environmentally friendly method for processing municipal solid waste is pyrolysis. Pyrolysis allows obtaining a combination of solid, liquid and gaseous products in various proportions due to changes in process parameters. A promising area for the use of solid pyrolysis products is the production of various materials for industrial, civil and road construction. There are some known methods for producing cement, concrete and foam glass with improved properties on pyrolysis basis. In modern building technologies, ceramic materials are widely used. Their production requires various expensive additives such as quartz sand, dolomite, coal, coal mining rocks, etc. Thus, it seems relevant to use the residue of the pyrolysis

of municipal solid waste as a free of charge structure-forming additive for the production of ceramic material. To determine the scope of the material application and to perform subsequent thermotechnical calculations, the data on its thermophysical characteristics is required.

**Materials and methods.** To determine the thermophysical characteristics of the ceramic material, the experimental method of the cylindrical layer and the calculation-experimental method of inverse heat conduction problem are used.

**Results.** The experimental studies of thermophysical properties of the new ceramic material have allowed obtaining the dependence of the average specific heat capacity and thermal diffusivity of the ceramic material on temperatures in the range of 30–90 °C, and the coefficient of thermal conductivity on the temperatures in the range of 30–500 °C. These characteristics enable to perform calculations of thermal processes that occur in the material during its industrial use. The coefficient of thermal conductivity of the material varies from 0,3 to 0,65 W/m·K, thermal diffusivity varies within  $(1,8-2,3) \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , and the average specific heat capacity changes from 780 to 1300 J/kg·K, which is comparable with the thermophysical characteristics of known ceramic materials.

**Conclusions.** It is advisable to use the pyrolysis residue of municipal solid waste as a free raw material instead of expensive additives to obtain ceramic material. It is recommended to use the new ceramic material in the production technology of building products for various purposes.

**Key words:** pyrolysis, municipal solid waste, solid carbon residue, thermophysical properties, ceramic material

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2020.3.016-023

**Введение.** Сложность проблемы утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) обусловлена необходимостью решения многофакторной задачи эколого-экономического обоснования выбора конкретной технологии утилизации отходов и применения капиталоемкого оборудования. До настоящего времени не существует единого мнения относительно того, какая из технологий утилизации отходов является наиболее рациональной.

В мировой практике реализовано более десятка технологий переработки твердых коммунальных отходов с использованием различных методов. Наиболее распространенными являются термические методы (сжигание, пиролиз, газификация).

Пиролиз (термическая деструкция) ТКО представляет собой одно из перспективных направлений переработки твердых коммунальных отходов с точки зрения как экологической безопасности, так и получения вторичных полезных продуктов. Пиролиз привлекает внимание своей гибкостью, позволяющей получить комбинацию твердых, жидких и газообразных продуктов в различных пропорциях только за счет изменения рабочих параметров, таких как температура и скорость процесса. Термическое разложение отходов может проводиться в режиме, обеспечивающем либо получение газа и твердого углеродистого остатка при минимальном выходе или даже полном отсутствии жидкой фракции (жизки), либо получение жижки в качестве одного из целевых продуктов.

Из всех образующихся в процессе пиролиза продуктов газообразные нашли наиболее широкое применение. С экономической точки зрения выгодным считается использование пиролизных газов в качестве топлива. Однако возможность такого использования определяется составом газов, который зависит от технологии переработки ТКО. Так, пиролизный газ технологии *Purox* можно рассматривать в качестве энергетического или энерготехнологического топлива вместо природного газа или мазута, поскольку он имеет высокую теплоту сгорания и высокую температуру горения, в то время как пирогаз технологий *Torrax* и *Landgart* содержит значительное количество молекулярного азота и имеет низкую теплотворную способность [1, 2]. Соответственно, он не пригоден для транспортировки и может использоваться только по месту производства. Однако, как показали исследования [2], можно повысить теплоту сгорания пиролизного газа посредством его метилирования.

Жижка, как правило, используется непосредственно в самом процессе пиролиза для выработки тепловой энергии. Технология получения из отходов жидкого топлива (пиротоплива) методом мгновенного пиролиза разработана компанией *Occidental Petroleum Corp* [2].

Твердые продукты пиролиза (твердый углеродистый остаток) коммунальных отходов содержат органические и неорганические компоненты. Одним из перспективных направлений является его применение

в металлургии в составе защитных материалов, используемых при разливке стали [3]. Рядом исследователей разработаны технологии, позволяющие из твердого углеродсодержащего остатка пиролиза автошин получить формованное топливо [4, 5]. Еще одним направлением использования пиролизного остатка является производство различных материалов для промышленного, гражданского и дорожного строительства, например цемента или пеностекла [2, 6]. Однако широкому промышленному применению твердого углеродистого остатка в последнее время уделяется недостаточно внимания, в то время как создание энергоэффективных безотходных технологий на основе его использования имеет большие перспективы.

Нами предложено использовать твердый углеродистый остаток пиролиза смеси ТКО среднего морфологического состава [7] в технологии производства керамического материала в качестве структурофазообразующей добавки. Химический состав материала представлен следующими соединениями:

$\text{SiO}_2$  – 53,7%,  $\text{Al}_3\text{Ca}_{0,5}\text{Si}_3\text{O}_{11}$  – 21,1%,

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 10,7%,  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$  – 14,5%.

Создание новых материалов, свойства которых определяются такими факторами, как физико-химические превращения, скорость нагрева, широкий температурный диапазон и другими, требует проведения экспериментальных исследований по определению их теплофизических характеристик.

**Методы исследования.** Целью настоящего исследования является определение теплофизических свойств (ТФС) (теплоемкости, плотности, коэффициентов теплопроводности и температуропроводности) керамического материала, полученного с использованием пиролизного остатка ТКО. Изучение ТФС веществ осуществляют экспериментальными и расчетно-экспериментальными методами.

Для определения коэффициента теплопроводности керамического материала использовали известный экспериментальный метод – стационарный метод цилиндрического слоя [8]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

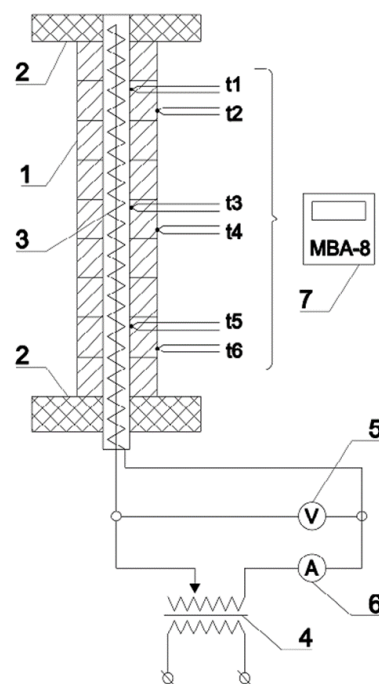


Рис. 1. Схема установки для определения коэффициента теплопроводности

Согласно данному методу, исследуемому материалу придали форму цилиндрической полой трубы, набранной из девяти коротких колец 1, плотно прилегающих друг к другу. Длина рабочего участка образца составила 200 мм. Внутренний диаметр исследуемого образца  $d_1 = 15$  мм, а наружный диаметр  $d_2 = 45$  мм. Для уменьшения тепловых потерь на торцах нагревателя установили теплоизолирующие втулки 2. Внутри материала поместили патронный электронагреватель (ТЭНП) 3, создающий равномерно распределенный по длине образца тепловой поток. При установившемся состоянии системы все количество теплоты, которое выделяется в электронагревателе, проходит через цилиндрический слой материала.

Электронагреватель питается через автотрансформатор 4 стабилизированным напряжением. Изменение мощности нагревателя производили изменением напряжения в цепи нагревателя. Количество теплоты, выделяемое электронагревателем, определяли по закону Джоуля-Ленца, для чего производили измерения напряжения и силы тока при помощи вольтметра 5 и амперметра 6.

Температуры исследуемого материала измеряли с помощью шести хромель-алюмелевых (ХА) термопар ДТПК 011-0,7 ( $t_1 \dots t_6$ ), горячие спаи которых заложены на

наружной ( $t_2$ ,  $t_4$ ,  $t_6$ ) и на внутренней ( $t_1$ ,  $t_3$ ,  $t_5$ ) поверхностях исследуемого материала.

Фиксацию значений температур производили с помощью аналогового модуля ввода МВА-8 (7). Передача данных на персональный компьютер осуществлялась посредством преобразователя АС-4 (RS-485 – USB). Значения температур фиксировали в специализированной программе с интервалом времени 1 с. Стабилизация температурного режима наступала через 90 мин после включения установки. Температуры внутренней и наружной поверхностей цилиндра усредняли по показаниям соответствующих термопар. В ходе экспериментов варьировали напряжение в интервале 20–200 В. При этом мощность нагревателя изменялась в диапазоне 2,4–310,6 Вт, а средняя температура образца – 30–515 °С. Результаты измерения температуры при мощности нагревателя 36,4 Вт представлены на рис. 2.

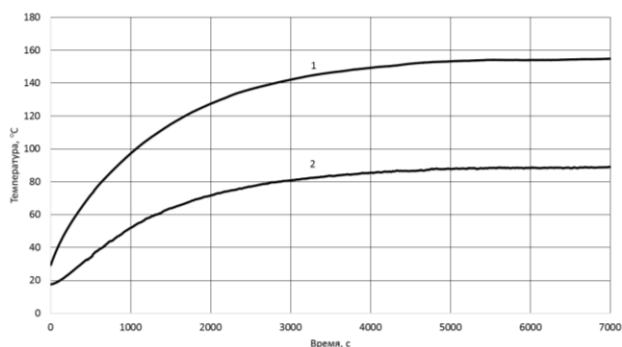


Рис. 2. Температуры образца при мощности нагревателя 36,4 Вт: 1 – внутренняя поверхность; 2 – наружная поверхность

Используя результаты измерения температуры, был рассчитан коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2\pi l(T_1 - T_2)}, \quad (1)$$

где  $d_1$ ,  $d_2$  – внутренний и наружный диаметр испытываемого цилиндра соответственно;  $T_1$ ,  $T_2$  – температура на внутренней и наружной поверхностях цилиндра;  $Q$  – тепловой поток, равный мощности нагревателя;  $l$  – длина цилиндра.

Одним из перспективных подходов к определению ТФС материалов является проведение расчетно-экспериментальных теплофизических исследований, основанных на обработке экспериментальных дан-

ных методами обратных задач теплопроводности (ОЗТ), когда по результатам измерения граничных условий и температуры во внутренних точках исследуемого образца определяют его неизвестные теплофизические характеристики.

Нами была использована разработанная ранее методика нахождения коэффициента температуропроводности [9], в основу которой положен численно-аналитический метод дискретного удовлетворения краевых условий (ДУКУ) [10], в соответствии с которым дифференциальное уравнение теплопроводности удовлетворяется непрерывно, а граничные условия – дискретно в  $g$  моментах времени, равномерно выбранных на рассматриваемом отрезке времени. Расчет методом ДУКУ базируется на точном аналитическом решении задачи теплопроводности для тел канонической формы, в частности для неограниченной пластины, при граничных условиях I рода.

Была проведена серия лабораторных экспериментов по нагреву керамических образцов на установке, схема которой представлена на рис. 3.

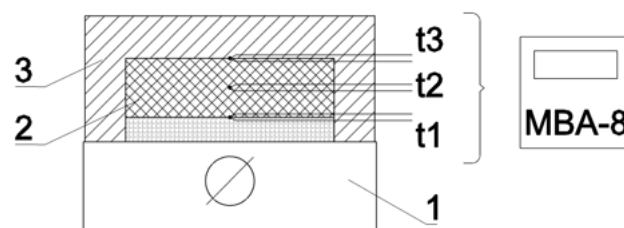


Рис. 3. Схема установки для определения коэффициента температуропроводности

Методика эксперимента заключалась в следующем. Керамический образец 1 толщиной 23 мм помещали на нагревательное устройство 3 и накрывали тепловой изоляцией 3. По высоте образца размещали 3 термопары типа ТХА(К) ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ). Для получения правильного представления о поле температур образца особое внимание обращали на точность размещения термопар в образце. Для исключения переноса теплоты через электроды термопары устанавливали с торца и размещали в изотермических поверхностях. Точки замера температуры выбирали на оси тела или около нее, так как температурные градиенты здесь либо равны нулю, либо невелики. Все это позволяло величину ошибки при замерах свести к минимуму. Сигнал с тер-

мопар поступал на аналоговый модуль МВА-8 и далее обрабатывался на компьютере. Показания термомпар фиксировали с интервалом времени в одну секунду.

В процессе нагрева образца ТКО измеряли температуру в расчетных сечениях по высоте слоя, как это показано на рис. 3. Для получения более достоверных результатов и во избежание влияния случайных погрешностей один и тот же эксперимент повторяли не менее 5 раз. В качестве исходных данных для последующих расчетов принимали усредненные по числу опытов значения температур для данного режима нагрева (рис. 4).

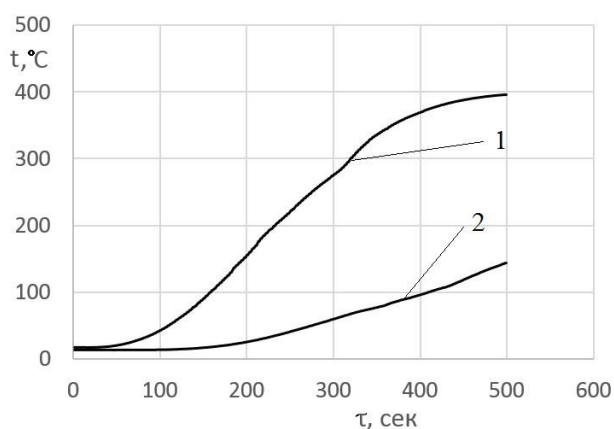


Рис. 4. Температуры образца: 1 – наружная поверхность  $T(R, \tau)$ ; 2 – внутренняя поверхность  $T(0, \tau)$

Используя полученные экспериментальные значения  $T(0, \tau)$  и  $T(R, \tau)$  и с последующим обращением к программной реализации алгоритма решения ОЗТ, находили соответствующие величины коэффициента температуропроводности, исходя из условия обеспечения среднеквадратичного расхождения расчетных и экспериментальных данных не более 8 %.

Для определения теплоемкости исследуемого материала воспользовались известной формулой:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p}, \quad (2)$$

где  $\lambda$ ,  $a$  – полученные из экспериментов коэффициенты теплопроводности и температуропроводности;  $\rho$  – плотность, найденная по формуле

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3)$$

где  $m$  – масса образца, полученная методом взвешивания;  $V$  – объем образца, найденный прямым измерением.

**Результаты.** Используя приведенные выше методы, были определены теплофизические коэффициенты нового керамического материала, полученного с использованием в качестве структурообразующей добавки твердого углеродистого остатка пиролиза смеси ТКО среднего морфологического состава.

Средняя плотность материала составила  $1752,6 \text{ кг/м}^3$ .

Полученная зависимость коэффициента теплопроводности от температуры в диапазоне  $30\text{--}515 \text{ }^\circ\text{C}$  показана на рис. 5.

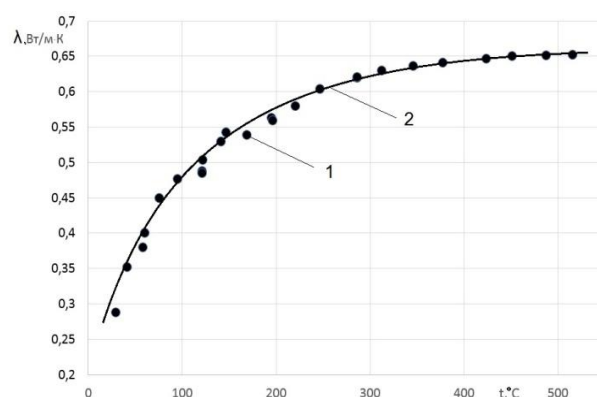


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности керамического материала от температуры: • – результаты эксперимента; 2 – аппроксимирующая кривая

Анализ полученных данных (рис. 5) показывает, что коэффициент теплопроводности неравномерно возрастает с увеличением температуры. Полученные экспериментальные данные аппроксимированы зависимостью вида

$$\lambda = 0,243 + 2,83 \cdot 10^{-3} \cdot t - 7,012 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 5,968 \cdot 10^{-9} \cdot t^3$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,984$ .

Зависимость коэффициента температуропроводности от температуры  $a = f(t)$ , представленная на рис. 6, носит убывающий характер.

Полученные экспериментальные данные аппроксимированы линейным уравнением вида

$$a = 2,2843 \cdot 10^{-7} - 4,2226 \cdot 10^{-10} \cdot t$$

с достоверностью  $R^2 = 0,98$ .

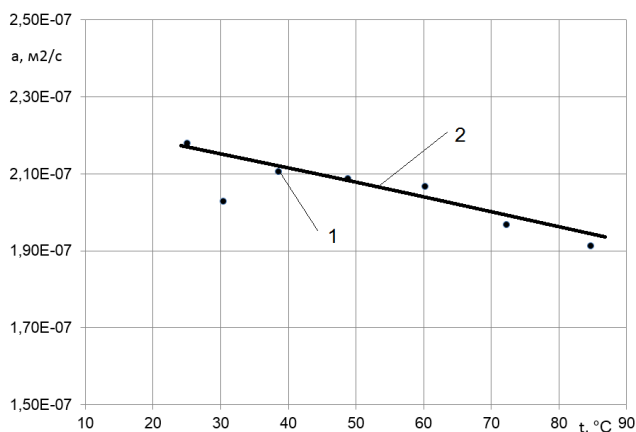


Рис. 6. Зависимость коэффициента температуропроводности от температуры: • – результаты эксперимента; 2 – аппроксимирующая кривая

Зависимость средней удельной теплоемкости от температуры получили расчетом по формуле (2) с использованием экспериментальных данных (рис. 5, 6). Результаты представлены на рис. 7.

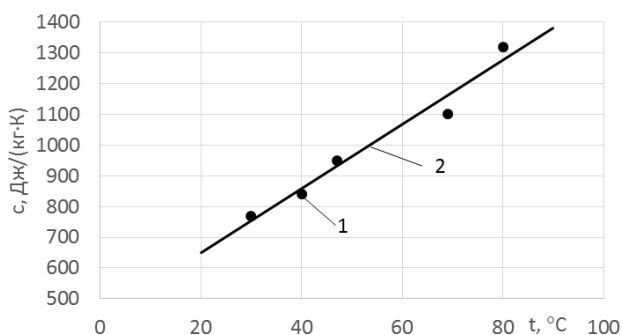


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплоемкости от температуры: • – результаты эксперимента; 2 – аппроксимирующая кривая

Полученные экспериментальные данные аппроксимированы зависимостью вида  $c = 441,452 + 10,430 \cdot t$ .

Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,985$ .

Полученные данные о ТФС исследуемого материала сопоставимы со значениями теплофизических характеристик известных керамических материалов [11].

**Выводы.** В результате проведенных расчетно-экспериментальных исследований теплофизических свойств нового керамического материала, полученного с использованием в качестве структурообразующей добавки твердого углеродистого остатка пиролиза смеси ТКО среднего морфологического состава, получены температурные зависимости средней удельной теплоемкости и коэффициента температуропроводности керамического

материала в диапазоне 30–90 °С, а коэффициента теплопроводности – в диапазоне 30–500 °С, что сопоставимо с теплофизическими характеристиками известных керамических материалов. Таким образом, целесообразно использовать пиролизный остаток твердых коммунальных отходов в технологии получения новых керамических изделий вместо дорогостоящих добавок.

### Список литературы

1. **Алексеев Г.М., Петров В.Н., Шпильфогель П.В.** Индустриальные методы санитарной очистки городов (Термическая переработка бытовых отходов и использование продуктов пиролиза). – Л.: Стройиздат, 1983. – 96 с.
2. **Переработка** твердых бытовых отходов методом пиролиза. Обз. информ. – М.: ЦНИИТЭИМС, 1983. – 40 с.
3. **Термические** процессы в технологиях переработки твердых бытовых отходов: аналитическая оценка и практические рекомендации / Л.Я. Шубов, Л.Г. Федоров, Р.В. Залепухин, В.Ф. Кроткова // ВИНТИ, Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – 1998. – № 5. – С. 33–97.
4. **Технология** переработки твердого остатка пиролиза автошин в формованное топливо / А.В. Папин, А.Ю. Игнатова, А.В. Неведров, К.А. Шиканова // Ползуновский вестник. – 2015. – № 5. – С. 106–110.
5. **Шиканова К.А.** Технология переработки твердого углеродсодержащего остатка, являющегося отходом пиролиза автошин // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2015. – № 4. – С. 80–83.
6. **Перспективы** использования продуктов термической утилизации твердых коммунальных отходов в технологии силикатных теплоизоляционных материалов / Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, А.А. Чумаков и др. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. – 2019. – № 3. – С. 77–81.
7. **Соломин И.А., Афанасьева В.И.** Состав и свойства твердых коммунальных отходов, учитываемые при выборе технических методов обращения с отходами // Природообустройство. – 2017. – Вып. 3 – С. 82–90. doi.org/10.26897/1997-6011-2017-3-82-90.
8. **Осипова В.А.** Экспериментальное исследование процессов теплообмена: учеб. пособие для теплоэнерг. спец. вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 319 с.
9. **Метод** определения эффективного коэффициента температуропроводности слоя органосодержащего сырья / О.Б. Колибаба, О.И. Горинов, Р.Н. Габитов, О.В. Самышина // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 6. – С. 16–19.

10. Бровкин Л.А., Крылова Л.С. Решение задач теплопроводности дискретным удовлетворением граничных условий // Вопросы теплообмена в промышленных установках: сб. науч. тр. – Иваново, 1971. – С. 56.

11. Четверикова А.Г., Каныгина О.Н., Кулеева А.Х. Теплоемкость кремнеземистой керамики при умеренных температурах // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. – 2011. – № 11. – С. 72–76.

## References

1. Alekseev, G.M., Petrov, V.N., Shpil'fel', P.V. *Industrial'nye metody sanitarnoy ochistki gorodov (Termicheskaya pererabotka bytovykh otkhodov i ispol'zovanie produktov piroliza)* [Industrial methods of sanitary cleaning of cities (Thermal processing of household waste and the use of pyrolysis products)]. Leningrad: Stroyizdat, 1983. 96 p.

2. *Pererabotka tverdykh bytovykh otkhodov metodom piroliza. Obzornaya informatsiya* [The processing of municipal solid waste by pyrolysis. Review inform]. Moscow: TsNIITEIMS, 1983. 40 p.

3. Shubov, L.Ya., Fedorov, L.G., Zalepukhin, R.V., Krotkova, V.F. Termicheskie protsessy v tekhnologiyakh pererabotki tverdykh bytovykh otkhodov: analiticheskaya otsenka i prakticheskie rekomendatsii [Thermal processes in solid waste processing technologies: analytical assessment and practical recommendations]. *VINITI, Nauchnye i tekhnicheskie aspekty okhrany okruzhayushchey sredy*, 1998, no. 5, pp. 33–97.

4. Papin, A.V., Ignatova, A.Yu., Nevedrov, A.V., Shikanova, K.A. Tekhnologiya pererabotki tverdogo ostatka piroliza avtoshin v formovannoe toplivo [Technology for processing solid residue of tire pyrolysis into molded fuel]. *Polzunovskiy vestnik*, 2015, no. 5, pp. 106–110.

5. Shikanova, K.A. Tekhnologiya pererabotki tverdogo uglersoderzhashchego ostatka, yavlyayushchegosya otkhodom piroliza avtoshin [Technology for processing solid carbon-containing residue, a waste of tire pyrolysis]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya:*

*Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2015, no. 4, pp. 80–83.

6. Yatsenko, E.A., Gol'tsman, B.M., Chumakov, A.A., Smoliy, V.A., Khol'shemakher, K., Bulgakov, A.G. Perspektivy ispol'zovaniya produktov termicheskoy utilizatsii tverdykh kommunal'nykh otkhodov v tekhnologii silikatnykh teploizolyatsionnykh materialov [Prospects for the use of thermal utilization products of solid municipal waste in the technology of silicate thermal insulation materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Severo-Kavkazskiy region*, 2019, no. 3, pp. 77–81.

7. Solomin, I.A., Afanas'eva, V.I. Sostav i svoystva tverdykh kommunal'nykh otkhodov, uchityvaemye pri vybore tekhnicheskikh metodov obrashcheniya s otkhodami [The composition and properties of municipal solid waste considered when choosing technical methods of waste management]. *Prirodoobustroystvo*, 2017, issue 3, pp. 82–90. doi.org/10.26897/1997-6011-2017-3-82-90.

8. Osipova, V.A. *Eksperimental'noe issledovanie protsessov teploobmena* [An experimental study of heat transfer processes]. Moscow: Energiya, 1979. 319 p.

9. Kolibaba, O.B., Gorinov, O.I., Gabitov, R.N., Samyshina, O.V. Metod opredeleniya effektivnogo koeffitsienta temperaturoprovodnosti sloya organosoderzhashchego syr'ya [Method for determining the effective coefficient of thermal diffusivity of a layer of organo-containing raw materials]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 6, pp. 16–19.

10. Brovkin, L.A., Krylova, L.S. Reshenie zadach teploprovodnosti diskretnym udovletvoreniem granichnykh usloviy [Solving heat conduction problems by discrete satisfaction of boundary conditions]. *Sbornik nauchnykh trudov «Voprosy teploobmena v promyshlennykh ustanovkakh»* [Sat. scientific tr. «Issues of heat and mass transfer in industrial plants»]. Ivanovo, 1971, p. 56.

11. Четверикова, А.Г., Каныгина, О.Н., Кулеева, А.Х. Теплоемкость кремнеземистой керамики при умеренных температурах [Heat capacity of siliceous ceramics at moderate temperatures]. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo slavyanskogo universiteta*, 2011, no. 11, pp. 72–76.

Колибаба Ольга Борисовна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедрой энергетика теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Kolibaba Olga Borisovna,

Ivanovo State Power Engineering University, PhD in Engineering, Head of Department of Thermal Engineering and Gas Supply, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Долинин Денис Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры энергетика теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Dolinin Denis Aleksandrovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer, Department of Thermal Engineering and Gas Supply, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

*Габитов Рамиль Наилевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетика теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: Ramilgab@mail.ru;

*Gabitov Ramil Nailevich,*

Ivanovo State Power Engineering University, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Thermal Engineering and Gas Supply, e-mail: Ramilgab@mail.ru;

*Шавитова Мария Олеговна,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант 2 курса, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

*Shavitova Maria Olegovna,*

Ivanovo State Power Engineering University, Master student, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

УДК 669.187.2; 537.84

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ В МНОГОЭЛЕКТРОДНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А.Л. КУХАРЕВ

ГОУВПО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», г. Луганск, Украина

E-mail: alex.kuharev@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Одним из основных конструктивных параметров многоэлектродных печей, во многом определяющих их теплоэнергетические и технико-экономические показатели, является отношение диаметра распада электродов к диаметру ванны  $D_p/D_b$ . Существующие методики выбора рациональных конструктивных параметров в большей степени относятся к дуговым печам, работающим на переменном токе промышленной частоты. Для многоэлектродных печей постоянного тока, в которых используются магнитогидродинамические эффекты для улучшения условий перемешивания и температурной гомогенизации расплава, отсутствуют зависимости параметров теплопереноса от диаметра распада электродов. Данное исследование является продолжением ряда патентов и статей, в которых обоснована конструкция, разработана математическая модель магнитогидродинамических и тепловых процессов в расплаве печи, содержащей три сводовых и три подовых электрода, произведена верификация модели по результатам физических экспериментов, исследованы параметры теплопереноса в печи при  $D_p/D_b \approx 0,2$ . Для предложенной печи целесообразно исследовать влияние  $D_p/D_b$  на параметры теплопереноса в расплаве, что позволит произвести рациональный выбор данного конструктивного параметра.

**Материалы и методы.** Результаты получены с помощью трехмерной математической модели магнитогидродинамических и тепловых процессов в расплаве стали, построенной при использовании безындукционного приближения с учетом  $k-\varepsilon$  модели турбулентности. Обработка результатов произведена с помощью методов анализа вихревых структур и оценки среднеинтегральных показателей гидродинамических и тепловых процессов в ванне расплава.

**Результаты.** Проведены численные эксперименты, в которых конструктивный параметр  $D_p/D_b$  изменялся от 0,2 до 0,5. Установлены новые научные данные о закономерностях изменения структуры течений и параметров теплопереноса в ванне расплава шестиэлектродной печи: с увеличением  $D_p/D_b$  в указанном диапазоне увеличивается интенсивность вертикальных вихревых течений, циркулирующих между осью соответствующей электрической дуги и осью ванны, а также азимутальных течений, циркулирующих в горизонтальных сечениях ванны; подавляются вихревые течения, формируемые за счет естественной конвекции вблизи боковых стенок печи; зоны максимальных значений эффективной теплопроводности, достигающей  $1,8 \cdot 10^5$  Вт/(м·К), перераспределяются в центральную область ванны, что способствует повышению равномерности распределения температуры в ванне. Полученные результаты позволяют рекомендовать рациональный диапазон значений  $D_p/D_b - 0,4-0,5$ , при котором в предлагаемой шестиэлектродной печи объем застойных зон уменьшается более чем на 40 % и более чем на 10 % увеличиваются интегральные значения числа Нуссельта в среднем по глубине горизонтальном сечении ванны.