

НАГРЕВ И ПЛАВЛЕНИЕ НАСЫПНЫХ КУСКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2018

- В. Л. Федяев** доктор технических наук, главный научный сотрудник Института механики и машиностроения; Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»; morenko@imm.knc.ru
- П. П. Осипов** доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института механики и машиностроения; Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»; petro300@rambler.ru
- А. В. Беляев** кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение, сварка и производственная безопасность»; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева; alexey-beljaev@mail.ru
- Л. В. Сироткина** кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия»; Казанский государственный энергетический университет; liliya_belyaeva@mail.ru

Пористые, в том числе насыпные, материалы широко применяются при очистке жидких и газообразных сред от механических примесей в качестве теплоизолирующих материалов, рабочих тел разнообразных технологий машиностроения, энергетики, металлургии, химии, нефтехимии и т.д. Целью работы является математическое моделирование переноса тепла в дисперсных насыпных средах, их плавления, получение инженерных оценок ряда важных для практики показателей. Рассматривается насыпная дисперсная среда, состоящая из твёрдых частиц (кусков) разной формы, размеров и состава, хаотически расположенных относительно друг друга. Приводятся соотношения для определения эффективной плотности, теплоёмкости, теплопроводности с учётом лучистого теплообмена между частицами (кусками) применительно к насыпным пористым материалам. С использованием полученных зависимостей решается модельная задача о нагреве и последующем плавлении рассматриваемой дисперсной среды. Оцениваются скорость плавления и время релаксации, в течение которого система, состоящая из расплава и кусков, приходит в термодинамическое равновесие. Предложенный подход можно обобщить на двух- и трёхмерные случаи и применить для математического описания теплового поведения неметаллических пористых материалов.

Пористые материалы; среды; нагрев; плавление; тепловые процессы.

Цитирование: Федяев В.Л., Осипов П.П., Беляев А.В., Сироткина Л.В. Нагрев и плавление насыпных кусковых материалов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 2. С. 174-182. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-174-182

Введение

Пористые материалы массово применяются в машиностроении, энергетике, металлургии, химии, нефтехимии, в других отраслях промышленности при реализации различных технологий в качестве рабочих сред и теплоизолирующих материалов; при очистке жидкостей и газов от механических примесей [1-20]. Выделим среди них, по нашему мнению, наиболее интересные: во-первых, технологии электродуговой плавки металлов, производства пористых изделий методами порошковой металлургии, нанесения порошковых покрытий на рабочие поверхности деталей и конструкций; во-вторых, процессы теплового поведения дисперсных теплоизоляционных материалов, в том числе насыпных.

Отличительная особенность названных процессов состоит в том, что структура нагреваемого материала весьма сложная, одновременно действуют разные механизмы теплопередачи, причём во многих случаях велика роль лучистого теплообмена, возможно изменение фазового состояния компонентов пористой среды. Поэтому математическое моделирование переноса тепла в этих средах представляет значительные трудности.

Целью настоящей работы является математическое моделирование теплопередачи в дисперсных насыпных средах, их плавления, а также получение инженерных оценок ряда важных для практики показателей.

Математическое описание

Рассматривается насыпная дисперсная среда, состоящая из разных твёрдых кусков, произвольно расположенных в пространстве. Предполагается, что промежутки между ними заполнены газом. Пусть средняя плотность твёрдых частиц ρ_m , тогда эффективная плотность среды определяется как [1;2]

$$\rho_s = (1 - m) + \rho_g m,$$

где m – пористость, ρ_g – плотность газа.

Если теплопроводность газовой среды существенно меньше теплопроводности материала кусков и мала скорость фильтрации газа [5; 21; 22], то перенос тепла за счёт конвекции учитывать не будем.

При контакте твёрдой и газовой фазы кондуктивная теплопередача предполагается малой, не учитывается также перенос тепла через участки соприкосновения соседних кусков, поскольку термические контактные сопротивления велики.

В результате доминирующими в данной дисперсной среде являются следующие виды распространения тепла:

- теплопроводность;
- лучистый теплообмен между более нагретыми и менее нагретыми кусками, когда пустоты между ними заполнены лучепрозрачной средой [8].

Сочетание названных видов теплопередачи вызывает специфическое поведение теплопроводности при увеличении температуры. При малых температурах среда плохо проводит тепло, поры изолируют теплопередачу от куска к куску. С увеличением температуры проводимость резко возрастает и приближается к теплопроводности материала кусков. В результате пористая среда ведёт себя как твёрдое сплошное тело, теплопроводность которого близка к средней теплопроводности материала кусков λ_m .

Для математического описания установленных особенностей теплопереноса выделим элементарный объём (рис. 1), предполагая, что материал дисперсной среды состоит:

- из сплошных кусков, расположенных в направлении теплового потока ξ ;
- кусков, разрывных в этом направлении;
- промежутков между кусками.

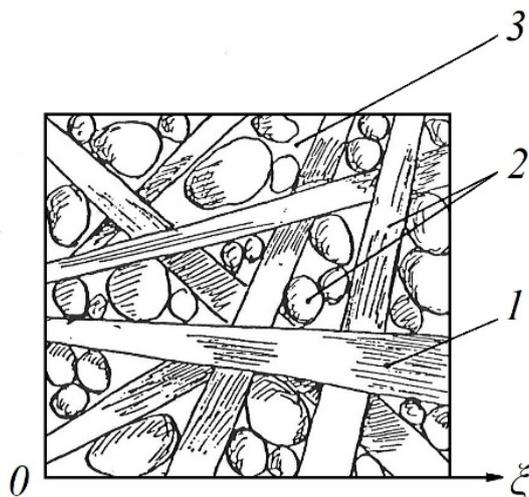


Рис. 1. Элементарный объём трёхкомпонентной среды:
1 – продольно расположенные куски; 2 – поперечные, разрывные куски; 3 – полости

При этом следует иметь в виду, что поры составляют последовательную цепь с термическими сопротивлениями $R_{\Pi} = 1 / (4\varepsilon_{\Pi}\sigma\gamma_{\Pi}d_{\Pi}T^3)$, где σ – постоянная Стефана-Больцмана, ε_{Π} характеризует поправку на неполную черноту пор; d_{Π} – средний размер пор в направлении распространения тепла ξ ; T – температура поверхности кусков, близкая к средней температуре среды; $\gamma_{\Pi} = \gamma_{\Pi}(m)$ – фактор формы пор.

Осуществляя осреднение по выделенному элементарному объёму, для оценки коэффициента теплопроводности рассматриваемой среды получим соотношение:

$$\lambda_s = (1 - J_{\Pi})\lambda_m + J_{\Pi} / (R_m + J_{S\Pi}(R_{\Pi} - R_m)), \quad (1)$$

где J_{Π} – порозность в сечении, поперечном к тепловому потоку; $J_{S\Pi}$ – отношение длины пустот к общей длине элементарного объёма в направлении ξ ; $R_m = 1/\lambda_m$.

Первое слагаемое в (1) характеризует вклад в теплоперенос кусков первого типа, второй – остальных составляющих среды. Относительный вклад названных частей описывается зависимостью:

$$r_{\Pi} = (1 - J_{S\Pi})R_m / J_{S\Pi}R_{\Pi} = 4\varepsilon_{\Pi}\gamma_{\Pi}S_k(1/J_{S\Pi} - 1), \quad (2)$$

где $S_k = \sigma d_{\Pi}T^3 / \lambda_m$ – критерий Старка; при оценочных расчётах $J_{S\Pi} \sim 1 - \rho_s / \rho_m = m$.

Отметим, что формула (1) аналогична формуле Лоба [3] для ячеистых тел.

Если рассматривать распространение тепла в теле со сквозными отверстиями вдоль потока тепла, то имеем

$$\lambda_s = (1 - m)\lambda_m + m(\alpha_k + 4\varepsilon_{\Pi}\sigma d_{\Pi}T^3). \quad (3)$$

Здесь α_k – коэффициент, характеризующий конвективный теплообмен. В случае, когда $\alpha_k = 0$, выражение (3) получается из (2) при $J_{S\Pi} = 1$ и $J_{\Pi} = m$, $\gamma_n = 1$.

Естественной является ситуация, при которой распространение тепла в среде моделируется при условии, что в теле находятся сквозные, расположенные хаотически относительно направления потока тепла, отверстия. При этом в (1) $J_{II} = J_{SII} = m$, а коэффициент теплопроводности

$$\lambda_s = (1-m)\lambda_m + m / (R_m + m(R_{II} - R_m)). \quad (4)$$

Возможен также случай, когда $J_{II} = 1$, среда изотропная. Отсюда, согласно (1),

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_m} = \frac{1}{1-m + (m / 4\varepsilon_n \gamma_n S_k)}.$$

Можно показать, используя (1), что с ростом температуры среды коэффициент теплопроводности сильно увеличивается, стремясь к своему теоретическому пределу: $\lambda_{\max} = \lambda_m (1 - J_{II} + J_{II} / (1 - J_{SII}))$.

Согласно определению, эффективная температуропроводность среды $a_s = \lambda_s / (c_s \rho_s)$, где $c_s = c_m (1-m) \bar{\rho}_m + c_g m \bar{\rho}_g = c_m (1-m) \bar{\rho}_m$ – эффективная удельная теплоёмкость среды; c_m, c_g – удельная теплоёмкость материала твёрдой, газовой фаз соответственно; $\bar{\rho}_m = \rho_m / \rho_s$, $\bar{\rho}_g = \rho_g / \rho_s$.

Модельная задача

Известно, что перенос тепла в данной среде описывается уравнением:

$$c_s \rho_s \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{d\lambda_s}{dT} (\nabla T \cdot \nabla T) + \lambda_s \nabla^2 T. \quad (5)$$

Если в (5) $\frac{d\lambda_s}{dT}$, ∇T есть малые величины, то

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_s \nabla^2 T, \quad (6)$$

где, согласно (1), эффективный коэффициент температуропроводности равен

$$a_s = a_m + \frac{\rho_m / \rho_s - 1}{c_s \rho_s R_m + c_s (\rho_m - \rho_s) R_{II}},$$

$$a_m = \lambda_m / c_s \rho_m.$$

Предположим, что вдоль направления распространения тепла на границу рассматриваемой среды воздействует тепловой поток мощностью q . При условии, что в этом же направлении действует сила тяжести, выделим в этом процессе две основные

стадии: первоначального нагрева поверхности среды до температуры плавления и установившегося плавления.

На первой стадии задача заключается в интегрировании уравнения (6), когда $-\lambda_s \partial T / \partial \xi_{\xi=0} = \text{const}$, $T(\tau = 0) = T_0$.

На второй стадии считается, что конвективная передача тепла от расплава к металлу кусков мала (за короткое время стекания расплав не успевает обменяться теплом с ними), скорость плавления w_s постоянна по времени, профиль температуры в среде представляет собой бегущую волну $T = T(\xi - w_s \tau)$. В таком случае решение уравнения (6) при граничных условиях

$$-\lambda_s \partial T / \partial \xi_{|\xi=w_s \tau} = q - \rho_s w_s L_s,$$

$$T_{|\xi=w_s \tau} = T_{nl}, \quad T(\xi, \tau)_{|\xi \rightarrow \infty} \approx T_{u0}$$

определяется соотношением

$$T = T_0 + \Delta T_{nl} \exp(-w_s (\xi - w_s \tau) / a_s), \quad (7)$$

где

$$w_s = q / \rho_s (L_s + c_m \Delta T_{nl}), \quad (8)$$

L_s – скрытая теплота плавления.

Обратимся к области, в которой пространство между кусками занято скопившимся расплавом. Предпосылкой сохранения в жидком металле (расплаве) кусков является то, что расплав при движении вниз не успевает нагреть их. Кроме того, температура жидкого металла фактически равняется T_{nl} , перегрев отсутствует.

Итак, пусть в единице объёма находится среда с насыпной плотностью ρ_s и температурой T_0 . Затем в этот объём поступает расплав с температурой T_{nl} до полного заполнения пустот между кусками. Через некоторое время (время релаксации τ_p) система приходит в термодинамическое равновесие с постоянной температурой T_m . Оценим значения данных параметров.

Очевидно, что время выравнивания температур τ_p зависит от размеров наибольшего куска l следующим образом: $\tau_p \sim l^2 / a_m$. Поскольку энтальпии материала кусков $i_u = c_m \rho_s T_0$ и расплава $i_p = (c_m T_{nl} + L_s)(\rho_l - \rho_s)$ в сумме равняются энтальпии твёрдой фазы $i_m = c_m \rho_l T_m$, имеем $T_m = T_0 + (1 + K_{nl})(1 - \rho_s / \rho_l) \Delta T_{nl}$, где ρ_l – плотность расплава, $K_{nl} = L_s / c_m \Delta T_{nl}$ – критерий фазового перехода. Отсюда предельная плотность среды, при которой в расплаве не остаются твёрдые куски, будет: $\rho_s^* = (1 - (1 + K_{nl})^{-1}) \rho_l$.

В случае воздействия на поверхность элементарного объёма $\xi = 0$ тепловой нагрузки q на первой стадии в результате интегрирования уравнения (6) при названных выше условиях найдём решение:

$$T = T_0 + (2q/\lambda_s) \left((a_s \tau / \pi)^{1/2} \exp(-\xi^2 / 4a_s \tau) - 0,5 \xi^2 F(\xi / 2(a_s \tau)^{1/2}) \right), \quad (9)$$

где F – функция ошибок.

Из (9) следует, что температура плавления на поверхности кусков среды достигается в момент времени $\tau_{пл} = (\pi/a_s)(\lambda_s \Delta T_{пл} / 2q)^2$, ($\Delta T_{пл} = T_{пл} - T_0$). При $a_s = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda_s = 40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\Delta T_{пл} = 1500^\circ\text{С}$ и характерных тепловых нагрузках на стадии расплавления материала кусков $q = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2$ найдём, что $\tau_{пл} \approx 1$ мин, т.е. время первой стадии сравнительно мало.

В период установившегося плавления кусков (вторая стадия) из (7) видно, что основные тепловые возмущения сосредоточены в пограничном слое толщиной $\delta = a_s/w_s$. При указанных выше параметрах $\delta \approx 0,015 \text{ м}$, $w_s \approx 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}/\text{с}$, т.е. толщина теплового пограничного слоя и скорость смещения межфазной границы в рассматриваемом примере достаточно большие.

На конечной стадии расплавления кусков твёрдого материала в расплаве согласно полученных оценок при $l \approx 0,1 \text{ м}$, $\rho_l \approx 7,1 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$, $a_m \approx 0,61 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $c_m = 0,85 \text{ кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$, $L_s = 272 \text{ кДж}/\text{кг}$, $\Delta T_{пл} = 1500^\circ\text{С}$, время релаксации $\tau_p \sim 0,5 \text{ ч}$, критерий фазового перехода $K_{пл} \sim 0,21$, предельная плотность среды $\rho_s^* \approx 1,2 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$. Это означает, что за время расплавления кусков среды, составляющего около 40 мин, температуры жидкого металла и твёрдых кусков успевают выровняться, причём твёрдая фаза в расплаве практически всегда присутствует.

Заключение

В рассмотренных процессах нагрева и плавления шихты, спекания порошковых материалов, формирования порошковых покрытий движение газовой среды в поровом пространстве незначительно, и поэтому нет необходимости рассматривать в модели переноса тепла конвективную составляющую. Однако существуют многочисленные технологии, например, газопламенного нагрева, резки дисперсных материалов, нагрева (охлаждения) насадок теплообменников-регенераторов, транспирационного охлаждения, конвективной сушки насыпных сред, в которых конвективный теплообмен играет большую роль. Учёт его позволит расширить область применения соответствующих моделей. Кроме того, представленный в работе подход можно обобщить на случаи двух- и трёхмерного распространения тепла, применить для математического моделирования теплового поведения неметаллических пористых материалов.

Библиографический список

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 2. М.: Наука, 1987. 360 с.
3. Чудновский А.Ф. Теплообмен в дисперсных средах. М.: Гостехиздат, 1954. 444 с.
4. Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов. М.: Химия, 1988. 352 с.
5. Кузеванов В.С., Закожурникова Г.С. Модель сушки пористого проницаемого материала при внутреннем нагреве // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2013. № 14 (136). С. 19-23.

6. Ломовцева Е.Е., Ульянова М.А., Гагапова Н.Ц. О пористой структуре гибридных сорбирующих материалов для осушки воздуха // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2014. Т. 20, № 2. С. 299-305.
7. Ключников А.Д., Иванцов Г.П. Теплопередача излучением в огнетехнических установках. М.: Энергия, 1970. 400 с.
8. Невский А.С. Лучистый теплообмен в печах и топках. М.: Metallurgy, 1971. 439 с.
9. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. М.: Metallurgy, 1985. 479 с.
10. Осипов П.П., Федяев В.Л. Об организации плавления шихты по оптимальному режиму в электропечах // Сталь. 1994. № 6. С. 41-44.
11. Ровин С.Л., Ровин Л.Е., Жаранов В.А. Расчёт процесса нагрева шихты // Литье и металлургия. 2009. № 3 (52). С. 204-208.
12. Малахова О.И. Влияние способа загрузки металлизированных окатышей на процессы, протекающие при нагреве и плавлении шихты в дуговых печах // Сб. материалов Тринадцатой Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство». Т. 1. Старый Оскол, 2016. С. 84-87.
13. Чередниченко В.С., Бикеев Р.А., Сериков В.А., Кузьмин М.Г. Исследование скоростей плавления шихты в расплаве в сверхмощных дуговых электропечах // Электromеталлургия. 2016. № 8. С. 2-7.
14. Наймушин А.С., Андреев А.Д., Беляев А.В., Федяев В.Л. Моделирование плавления насыпных кусковых материалов // Сб. материалов II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Наука в движении: от отражения к созданию реальности». М.: Перо, 2017. С. 111-116.
15. Меркер Э.Э., Малахова О.И., Крахт Л.Н., Казарцев В.О. Теплоэнергетические особенности электроплавки железнорудных металлизированных окатышей в дуговой сталеплавильной печи // Сталь. 2017. № 3. С. 22-26.
16. Рудской А.И., Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Определение теплофизических свойств материалов для моделирования процесса получения металлических гранул // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. № 3 (202). С. 170-179.
17. Якушев Е.В., Маслов Е.В., Востриков В.Г., Зубов С.П., Кузнецов М.С., Куликов В.В. Способ выплавки стали в дуговых печах: патент РФ № 2451091; опубл. 20.05.2012; бюл. №14.
18. Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.
19. Яковлев А.Д. Порошковые краски. Л.: Химия, 1987. 216 с.
20. Моссэ А.Л., Савчин В.В. Плазменные технологии и устройства для переработки отходов. Минск: Белорусская наука, 2015. 414 с.
21. Стерлигов В.В., Шадринцева Д.А. Влияние структуры теплоизоляционных материалов на коэффициент теплопроводности // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. 2014. № 2. С. 30-33.
22. Жуков А.Д., Бессонов И.В., Сапелин А.Н., Мустафаев Р.М. Композиционные материалы с регулируемой пористостью // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 6. С. 58-61.

HEATING AND MELTING OF BULK LUMP MATERIALS

© 2018

- V. L. Fedyayev** Doctor of Science (Engineering), Chief Researcher of the Institute of Mechanics and Engineering;
Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation;
morenko@imm.knc.ru
- P. P. Osipov** Doctor of Science (Phys. & Math.), Leading Researcher of the Institute of Mechanics and Engineering;
Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation;
petro300@rambler.ru
- A. V. Belyaev** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Materials Science, Welding and Production Safety;
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev, Kazan, Russian Federation;
alexey-beljaev@mail.ru
- L. V. Sirotkina** Candidate of Science (Chemistry), Associate Professor of the Department of Chemistry;
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation;
liliya_belyaeva@mail.ru

Porous materials, including bulk materials, are widely used for cleaning liquid and gaseous media from mechanical impurities, as heat insulating materials, working bodies in various technologies of mechanical engineering, power engineering, metallurgy, chemistry, petroleum chemistry, food industry, pharmacology, etc. The aim of the work is mathematical modeling of heat transfer in disperse bulk media, their melting, engineering assessment of a number of indicators essential in practice. A bulk disperse medium consisting of solid particles (lumps) of different shapes, sizes and composition, randomly arranged relative to each other, is considered. The article provides relationships for determining effective density, heat capacity, thermal conductivity, taking into account radiant heat transfer between particles (lumps) as applied to porous bulk materials. Using the obtained relationships, the model problem of heating and subsequent melting of the disperse medium under consideration is solved. The melting rate and the relaxation time during which the system consisting of melt and lumps comes to thermodynamic equilibrium are assessed. Though only one-dimensional thermal processes are considered in this paper, the proposed approach can be extended to two- and three-dimensional cases and applied for mathematical description of thermal behavior of nonmetallic porous materials. It is these materials that are mainly used for thermal insulation. Their behavior, especially in extreme, abnormal conditions is of great interest.

Porous materials; environment; heating; melting; thermal processes.

Citation: Fedyayev V.L., Osipov P.P., Belyaev A.V., Sirotkina L.V. Heating and melting of bulk lump materials. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 2. P. 174-182. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-174-182

References

1. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred. Ch. 1* [Dynamics of multiphase media. Part 1]. Moscow: Nauka Publ., 1987. 464 p.
2. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred. Ch. 2* [Dynamics of multiphase media. Part 2]. Moscow: Nauka Publ., 1987. 360 p.
3. Chudnovskiy A.F. *Teploobmen v dispersnykh sredakh* [Heat exchange in disperse media]. Moscow: Gostekhizdat Publ., 1985. 444 p.
4. Mushtayev V.I., Ul'yanov V.M. *Sushka dispersnykh materialov* [Drying of disperse materials]. Moscow: Khimiya Publ., 1988. 352 p.
5. Kuzevanov V.S., Zakozhurnikova G.S. Drying model of the porous permeable material at the internal heating. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2013. No. 14 (136). P. 19-23. (In Russ.)

6. Lomovtseva E.E., Ulyanova M.A., Gatapova N.Ts. On porous structure of sorbing hybrid materials for air drying. *Transactions of the Tambov State Technical University*. 2014. V. 20, no. 2. P. 299-305. (In Russ.)

7. Klyuchnikov A.D., Ivantsov G.P. *Teploperedacha izlucheniym v ognetekhnicheskikh ustanovkakh* [Radiative heat transfer in fire-engineering installations]. Moscow: Energiya-Publ., 1970. 400 p.

8. Nevskiy A.S. *Luchisty teploobmen v pechakh i topkakh* [Radiant heat transfer in ovens and furnaces]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1971. 439 p.

9. Voskoboynikov V.G., Kudrin V.A., Yakushev A.M. *Obshchaya metallurgiya* [General metallurgy]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1985. 479 p.

10. Osipov P.P., Fedyaev V.L. How to arrange charge melting to optimal conditions on electric furnace. *Steel in Translation*. 1994. No. 6. P. 41-44.

11. Rovin S.L., Rovin L.Ye., Zharanov V.A. Calculation of the process of burden heating. *Foundry Production and Metallurgy*. 2009. No. 3 (52). P. 204-208. (In Russ.)

12. Malakhova O.I. The influence of the method of loading dri on the processes taking place during heating and melting of the charge in electric arc furnaces. *Sbornik materialov Trinadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennyye problem gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo»*. V. 1. Staryy Oskol, 2016. P. 84-87. (In Russ.)

13. Cherednichenko V.S., Bikeyev R.A., Kuzmin M.G. Study of melting rates of charge in melt in electric super-power arc furnaces. *Elektrometallurgiya*. 2016. No. 8. P. 2-7. (In Russ.)

14. Naymushin A.S., Andreev A.D., Belyaev A.V., Fedyaev V.L. Modelirovaniye plavleniya nasypanykh kuskovykh materialov. *Sbornik materialov II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Nauka v dvizhenii: ot otrazheniya k sozdaniyu real'nosti»*. Moscow: Pero Publ., 2017. P. 111-116. (In Russ.)

15. Merker E.E., Malakhova O.I., Krakht L.N., Kazartsev V.O. Melting of iron-ore pellets in an arc furnace. *Steel in Translation*. 2017. V. 47, Iss. 3. P. 205-209. DOI: 10.3103/S0967091217030093

16. Rudskoi A.I., Sokolov Yu.A., Kopaev V.N. Defining thermal-physical properties of materials to model the process of granulated metal production. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2014. No. 3 (202). P. 170-179. (In Russ.)

17. Yakushev E.V., Maslov E.V., Vostrikov V.G., Zubov S.P., Kuznetsov M.S., Kulikov V.V. *Sposob vyplavki stali v dugovykh pechakh* [Method of steel making in ARC-type furnaces]. Patent RF, no. 2451091, 2012. (Publ. 20.05.2012, bul. no. 14)

18. Belov S.V. *Poristyye metally v mashinostroyenii* [Porous metals in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 247 p.

19. Yakovlev A.D. *Poroshkovyye kraski* [Powder paints]. Leningrad: Khimiya Publ., 1987. 216 p.

20. Mosse A.L., Savchin V.V. *Plazmennyye tekhnologii i ustroystva dlya pererabotki otkhodov* [Plasma technologies and devices for waste processing]. Minsk: Belorusskaya Nauka Publ., 2015. 414 p.

21. Sterligov V.V., Shadrintseva D.A. Influence of structure of thermal insulating materials on the coefficient of thermal conductivity. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014. No. 2. P. 30-33. (In Russ.)

22. Zhukov A.D., Bessonov I.V., Sapelin A.N., Mustafayev R.M. Composite materials with controlled porosity. *Industrial and Civil Engineering*. 2014. No. 6. P. 58-61. (In Russ.)