

Математическое моделирование теплообмена капли доменного шлака при движении в закрученном потоке газа / Н. Н. Синицын, Н. В. Запатрина, И. А. Сарычева и др. // Прикладная математика и вопросы управления. – 2025. – № 2. – С. 6–21. DOI 10.15593/2499-9873/2025.2.01

Библиографическое описание согласно ГОСТ Р 7.0.100–2018

Математическое моделирование теплообмена капли доменного шлака при движении в закрученном потоке газа / Н. Н. Синицын, Н. В. Запатрина, И. А. Сарычева, Ю. В. Грибкова, Е. В. Голицына, Ю. В. Донцова. – Текст : непосредственный. – DOI 10.15593/2499-9873/2025.2.01 // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. – 2025. – № 2. – С. 6-21.



ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА
И ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ

№ 2, 2025

<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Научная статья

DOI: 10.15593/2499-9873/2025.2.01

УДК 669.1(07)



Математическое моделирование теплообмена капли доменного шлака при движении в закрученном потоке газа

Н.Н. Синицын^{1,2}, Н.В. Запатрина², И.А. Сарычева², Ю.В. Грибкова²,
Е.В. Голицына², Ю.В. Донцова¹

¹Череповецкий государственный университет, Череповец, Российская Федерация

²Военный университет радиоэлектроники, Череповец, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 05 апреля 2024

Одобрена: 29 мая 2024

Принята к публикации:

08 августа 2025

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Эквивалентный.

Ключевые слова:

капля жидкого доменного шлака, охлаждение, закрученный газовый поток, температурное поле, траектория движения, сухая грануляция

АННОТАЦИЯ

Моделируется теплообмен одиночной капли жидкого доменного шлака в циклонном устройстве установки сухой грануляции.

В статье представлена математическая модель процесса охлаждения жидкого доменного шлака для одиночной капли при ее движении в закрученном потоке газа. Определены температурные поля в жидкой капле с учетом двухфазной зоны. Определены траектории движения капли в закрученном потоке газа. Разработан алгоритм расчета траектории движения капли в закрученном потоке при ее охлаждении.

Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать характерные размеры грануляционной камеры при ее проектировании, а также управлять процессом охлаждения капель, получающихся при дисковом распыле в установке сухой грануляции жидкого доменного шлака.

© Синицын Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплоэнергетики и теплотехники, профессор кафедры математики, e-mail: nnsinitcyn@chsu.ru, ORCID 0000-0001-8619-0573.

Запатрина Наталия Владимировна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой математики, e-mail: z_natalia777@mail.ru, ORCID 0009-0001-5558-5291.

Сарычева Ирина Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры математики, e-mail: sariranat@gmail.com, ORCID 0000-0002-8925-209X.

Грибкова Юлия Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры математики, e-mail: 150475@mail.ru, ORCID 0000-0002-2370-1251.

Голицына Елена Викторовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики, e-mail: e_golitsyna@mail.ru, ORCID 0009-0007-9602-2114.

Донцова Юлия Викторовна – аспирант кафедры теплоэнергетики и теплотехники, e-mail: iuvdontcova@chsu.ru, ORCID 0009-0004-0647-3703.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

Perm Polytech Style: Sinitsyn N.N., Zapatrina N.V., Sarycheva I.A., Gribkova J.V., Golitsyna E.V., Dontsova J.V. Mathematical modeling of heat exchange of blast furnace slag droplets in a swirling gas flow. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2025, no. 2, pp. 6-21. DOI: 10.15593/2499-9873/2025.2.01

MDPI and ACS Style: Sinitsyn, N.N.; Zapatrina, N.V.; Sarycheva, I.A.; Gribkova, J.V.; Golitsyna, E.V.; Dontsova, J.V. Mathematical modeling of heat exchange of blast furnace slag droplets in a swirling gas flow. *Appl. Math. Control Sci.* **2025**, *2*, 6-21. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2025.2.01>

Chicago/Turabian Style: Sinitsyn, Nikolay N., Natalia V. Zapatrina, Irina A. Sarycheva, Julia V. Gribkova, Elena V. Golitsyna, and Julia V. Dontsova. 2025. "Mathematical modeling of heat exchange of blast furnace slag droplets in a swirling gas flow". *Appl. Math. Control Sci.* no. 2: 6-21. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2025.2.01>



APPLIED MATHEMATICS
AND CONTROL SCIENCES

№ 2, 2025

<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Article

DOI: 10.15593/2499-9873/2025.2.01

UDC 669.1(07)



Mathematical modeling of heat exchange of blast furnace slag droplets in a swirling gas flow

N.N. Sinitsyn^{1,2}, N.V. Zapatrina², I.A. Sarycheva², J.V. Gribkova²,
E.V. Golitsyna², J.V. Dontsova¹

¹Cherepovets State University, Cherepovets, Russian Federation

²Military University of Radio Electronics, Cherepovets, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 05 April 2024

Approved: 29 May 2024

Accepted for publication:
08 August 2025

Funding

This research received no external funding.

Conflicts of Interest

The author declares no conflict of interest.

Author Contributions

100 %.

Keywords:

liquid blast furnace slag droplet,
cooling, swirling gas flow, dry
granulation

ABSTRACT

The paper presents a mathematical model of the cooling process of liquid blast furnace slag for a single droplet as it moves in a swirling gas flow.

The temperature fields of the liquid droplet during its solidification are determined, taking into account the two-phase zone. The trajectories of a droplet in a swirling flow have been determined. An algorithm for calculating the trajectory of a droplet in a swirling flow during its cooling has been developed.

The developed mathematical model makes it possible to predict the characteristic dimensions of a granulation chamber when designing it, as well as to control the process of cooling the droplets produced by disk atomization of blast furnace slag in the dry granulation unit of liquid blast furnace slag.

© **Nikolay N. Sinitsyn** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Cherepovets State University, Professor, Department of Mathematics, Military University of Radio Electronics, e-mail: nnsinitcyn@chsu.ru, ORCID 0000-0001-8619-0573.

Natalia V. Zapatrina – CSc of Technical Sciences, Associate Professor, Chairperson, Department of Mathematics, Military University of Radio Electronics, e-mail: z_natalia777@mail.ru, ORCID 0009-0001-5558-5291.

Irina A. Sarycheva – CSc of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mathematics, Military University of Radio Electronics, e-mail: sariranat@gmail.com, ORCID 0000-0002-8925-209X.

Julia V. Gribkova – CSc of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mathematics, Military University of Radio Electronics, e-mail: 150475@mail.ru, ORCID 0000-0002-2370-1251.

Elena V. Golitsyna – CSc of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mathematics, Military University of Radio Electronics, e-mail: e_golitsyna@mail.ru, ORCID 0009-0007-9602-2114.

Julia V. Dontsova – Ph. D. Student, Cherepovets State University, e-mail: iuvdntcova@chsu.ru, ORCID 0009-0004-0647-3703



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

Введение

При существующей мокрой грануляции доменного шлака используется вода. В процессе охлаждения водой жидкого шлака образуется большое количество вредных газообразных веществ, сероводород и другие сернистые соединения, загрязняющие окружающую среду. Сухая грануляция позволяет утилизировать физическую теплоту жидкого доменного шлака и при этом полностью исключаются вредные газообразные выбросы в окружающую среду [1; 2] и в результате получается качественное сырье – сухой гранулированный доменный шлак, который используется при производстве изоляционных и строительных материалов и цемента [3]. Выход доменного шлака составляет 0,3...0,6 т на 1 т чугуна [2; 4–9]. Количество физической теплоты доменного шлака при температуре 1400...1500 °С составляет 1,6...1,8 МДж/кг [10; 11]. При проектировании грануляционной камеры необходимо оценить ее основные размеры – диаметр и высоту, – чтобы исключить налипание жидкого шлака на стенки камеры. Минимальная температура полного затвердевания шлака составляет примерно 1200 °С [12]. В работе [13] представлено исследование температурного поля одиночной капли огненно-жидкого доменного шлака при ее движении во встречном потоке охлаждающего газа и определение траектории движения в грануляционной камере. При этом конструкция припечной грануляционной установки получается громоздкой. Поэтому целью представленной работы является исследование температурного поля одиночной капли доменного шлака при ее движении в закрученном потоке и определение траекторий движения, необходимых при прогнозировании характерных размеров камеры грануляции.

Постановка задачи

Принципиальная схема грануляционной циклонной камеры показана на рис. 1, *а*. Циклонное устройство можно схематически представить в виде цилиндра 4, ограниченного двумя торцевыми поверхностями, к внутренней поверхности 3 которого тангенциально вводится газ через сопла 6, а отводится поток через осесимметричное отверстие 5 в одном из его торцов (см. рис. 1, *а*).

Аэродинамика закрученного потока отличается большой сложностью и пространственностью. В любой точке вектор скорости можно разделить на три составляющие: тангенциальную w_ϕ , аксиальную w_z и радиальную w_r . Объем закрученного потока можно условно разделить на три области: осесимметричное ядро потока, состоящее из внутренней и внешней областей, приторцевые зоны течения и периферийную пристенную зону. Ядро потока занимает основную часть рабочего объема камеры. Внешней границей ядра потока является цилиндрическая поверхность радиусом $r_{\text{я}}$. В пределах ядра потока тангенциальная составляющая скорости имеет наибольшую из всех трех компонент величину. В соответствии с характером ее распределения по радиусу (рис. 1, *б*) можно выделить две зоны: зону возрастания скорости w_ϕ при уменьшении радиуса (квазипотенциальную зону) и зону ее падения по мере приближения к центру камеры (зону квазитвердого вращения) (см. рис. 1, *а*, *б*).

При двух- и более стороннем вводе потока течение в ядре практически осесимметрично. Поля скоростей газового потока в циклоне определяются по методике, представленной

в работе [14]. Аэродинамическая ось потока совпадает с осью камеры. Тангенциальная составляющая скорости в ядре потока значительно превышает другие компоненты скорости [14], поэтому основным видом движения здесь следует считать вращательное.

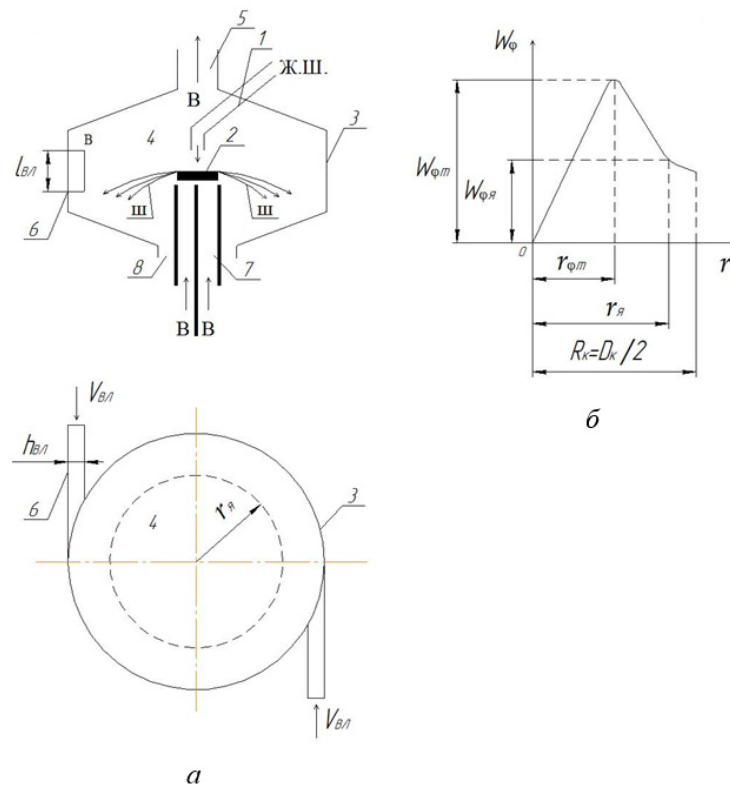


Рис. 1. Принципиальная схема грануляционной камеры и распределение тангенциальной составляющей скорости: 1 – канал подачи жидкого шлака; 2 – вращающийся диск; 3 – стенка грануляционной камеры; 4 – грануляционная камера; 5 – патрубок выхода горячего воздуха; 6 – тангенциальное сопло подачи холодного воздуха; 7 – подача холодного воздуха для охлаждения диска; 8 – канал удаления затвердевшего шлака; В – воздух; Ж.Ш. – жидкий шлак, Ш – капли шлака

Распределение безразмерной тангенциальной скорости по радиусу циклона может быть описано формулами [14]:

для внутренней зоны течения ($0 \leq \eta \leq 1$)

$$\overline{W}_\varphi = \frac{2\eta}{1+\eta} \cdot \overline{W}_{\varphi m};$$

для внешней зоны течения ($1 \leq \eta \leq \eta_y^l$)

$$\overline{W}_\varphi = \frac{2}{1+\eta} \cdot \overline{W}_{\varphi m};$$

где $\eta = r / r_{\varphi m}$, $\overline{W}_\varphi = W_\varphi / W_{\varphi m}$ – относительная скорость; W_φ – тангенциальная скорость потока; $W_{\varphi m}$ – максимальная тангенциальная скорость при радиусе, равном $r_{\varphi m}$; η_y^l – безраз-

мерный радиус осесимметричного ядра потока; $\overline{r_{\varphi m}^o} = \frac{\overline{d_{\text{ВЫХ}}}}{5 \left(\frac{0,85}{\overline{d_{\text{ВЫХ}}}} - 1 \right) \cdot \overline{f_{\text{ВХ}}} + 0,7}$ – безразмерный

радиус, характеризующий положение максимума тангенциальной скорости в рабочем объеме аппарата, при нулевой длине выходного канала; $\overline{d_{\text{вых}}} = \frac{d_{\text{вых}}}{D_k}$; $\overline{f_{\text{вх}}} = 4\alpha_{\text{вх}} h_{\text{вх}} l_{\text{вх}} / (\pi D_k^2)$;

$\overline{W_\phi} = \frac{W_\phi}{V_{\text{вх}}}$; $\overline{W_{\phi m}} = \frac{W_{\phi m}}{V_{\text{вх}}}$; $V_{\text{вх}}$ – скорость потока на входе в камеру; D_k – диаметр камеры.

Методика расчета температурного поля и толщины затвердевшей корочки шлака

Жидкий шлак с температурой 1400...1550 °С по каналу 1 подается на вращающийся диск 2, получающиеся капли б попадают в закрученный поток газа, до столкновения со стенкой 3 капли шлака в грануляционной камере должны затвердеть, т.е. охладиться до температуры ниже температуры плавления. Выделение теплоты затвердевания шлака не происходит, так как шлак из жидкого состояния переходит в аморфное стекловидное состояние [1] в некотором температурном диапазоне. Небольшая часть холодного воздуха по каналу 7 идет на охлаждение вращающегося диска 2.

Охлаждение капли жидкого доменного шлака радиусом r_0 осуществляется в закрученном потоке холодного газа с температурой T_Γ и описывается сквозным уравнением теплопроводности с переменными граничными условиями третьего рода, учитывающим теплообмен конвекцией и тепловым излучением. Схема расчетной области температурного поля показана на рис. 2.

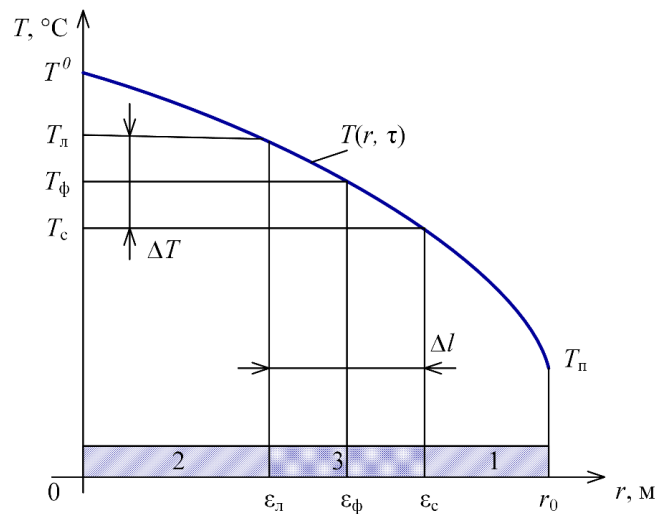


Рис. 2. Схема расчетной области: 1 – твердая фаза; 2 – жидкая фаза; 3 – двухфазная зона, содержащая твердую и жидкую фазы; ε_c , ε_ϕ , ε_λ – координаты температур начала и окончания фазового перехода и координаты фазового перехода доменного шлака; Δl , ΔT – интервал фазового перехода доменного шлака по координате и температуре

Задача о температурном поле в капле формулируется следующим образом:

$$C_{\phi}(T) \cdot \rho(T) \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T) \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right] + \frac{2\lambda(T)}{r} \cdot \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r}, \quad (1)$$

интегрируемое в области: $0 \leq r \leq r_0$; $0 \leq \tau \leq \tau_k$;

– начальное условие: $T(r, 0) = T^0$, (2)

– граничное условие:

$$\text{при } r = 0: \lambda(T) \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

$$\text{при } r = r_0: -\lambda(T) \frac{\partial T(r_0, \tau)}{\partial r} = \alpha [T(r_0, \tau) - T_r], \quad (3)$$

где $\rho(T)$, $\lambda(T)$ – плотность и коэффициент теплопроводности доменного шлака; $\alpha = \alpha_k + \alpha_l$ – коэффициент теплоотдачи; α_k и α_l – конвективный и лучистый коэффициент теплоотдачи; T^0 – начальная температура шлака; r – текущий радиус капли; τ – время; $T(r, \tau)$ – текущая температура шлака; τ_k – конечное время охлаждения.

Переход из жидкого состояния в затвердевшее состояние в уравнении (1) учитывают с помощью эффективной теплоемкости, задаваемой выражением:

$$c_{\text{эф}}(T) = \begin{cases} c_1(T) & \text{при } T(r, \tau) < T_c; \\ c_1(T) \cdot \psi + c_2(T) \cdot (1 - \psi) & \text{при } T_c \leq T(r, \tau) \leq T_l; \\ c_2(T) & \text{при } T(r, \tau) > T_l. \end{cases}$$

Коэффициент теплопроводности и плотность определяют по формулам:

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1(T) & \text{при } T(r, \tau) < T_c; \\ \lambda_1(T) \cdot \psi + \lambda_2(T) \cdot (1 - \psi) & \text{при } T_c \leq T(r, \tau) \leq T_l; \\ \lambda_2(T) & \text{при } T(r, \tau) > T_l, \end{cases}$$

$$\rho(T) = \begin{cases} \rho_1(T) & \text{при } T(r, \tau) < T_c; \\ \rho_1(T) \cdot \psi + \rho_2(T) \cdot (1 - \psi) & \text{при } T_c \leq T(r, \tau) \leq T_l; \\ \rho_2(T) & \text{при } T(r, \tau) > T_l, \end{cases}$$

где $T_c = T_{\text{ф}} - \Delta T/2$ и $T_l = T_{\text{ф}} + \Delta T/2$ – температуры начала и окончания фазового перехода доменного шлака из жидкого состояния в твердое; $c_1(T)$, $c_2(T)$ – удельные теплоемкости шлака в твердом и жидком состояниях; $\lambda_1(T)$ и $\lambda_2(T)$ – коэффициенты теплопроводности доменного шлака в твердом и жидком состояниях; $\rho_1(T)$ и $\rho_2(T)$ – плотности шлака в твердом и жидком состояниях; ψ – доля жидкого шлака, содержащегося в шлаке в двухфазной зоне; $T_{\text{ф}}$ – температура перехода шлака из жидкого состояния в твердое; ΔT – интервал температуры перехода шлака из жидкого состояния в твердое в двухфазной зоне.

Величина ψ определяется по формуле:

$$\psi = \begin{cases} 0 & \text{при } T(r, \tau) < T_c; \\ \frac{T_l - T(r, \tau)}{T_l - T_c} & \text{при } T_c \leq T(r, \tau) \leq T_l; \\ 1 & \text{при } T(r, \tau) > T_l. \end{cases}$$

Условный коэффициент теплоотдачи излучением α_l между поверхностью капли шлака и грануляционной камеры определяется выражением:

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{q_{\text{л}}}{T_{\text{к}} - T_{\text{с}}};$$

$$q_{\text{л}} = \left[\left(\frac{T_{\text{к}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{с}}}{100} \right)^4 \right] \cdot \varepsilon_{\text{пов}} \cdot c_0;$$

где $T_{\text{к}}$ – температура поверхности капли шлака; $T_{\text{с}}$ – температура поверхности стенки грануляционной камеры; $\varepsilon_{\text{пов}}$ – степень черноты поверхности капли, c_0 – излучательная способность абсолютно черного тела.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha_{\text{к}}$ определяется по формуле [15, с. 175]

$$\alpha_{\text{к}} = \overline{Nu} \cdot d / \lambda_{\text{г}},$$

где $\overline{Nu} = 2 + 0,03\text{Re}^{0,54} \cdot \text{Pr}^{0,33} + 0,35\text{Re}^{0,58} \cdot \text{Pr}^{0,36}$; d – диаметр капли, $\lambda_{\text{г}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха; $\text{Re} = W_{\text{отн}} \cdot d / \nu_{\text{г}}$ – критерий Рейнольдса; $W_{\text{отн}}$ – относительная скорость капли доменного шлака и воздуха; $\nu_{\text{г}}$ – коэффициент кинематической вязкости воздуха; Pr – число Прандтля.

Для доменного шлака принимаем: плотность твердого доменного шлака $\rho_1 = 2800$ кг/м³; жидкого $\rho_2 = 3000$ кг/м³, удельная теплоемкость твердого доменного шлака определяется по формуле с учетом данных [16], $c_1 = 0,85 + 15,6 \cdot 10^{-6} \cdot (T - 373) + 19,5 \cdot 10^{-8} \cdot (T - 373)^2$, кДж/(кг·К), T – температуры в градусах Кельвина. Теплоемкость жидкого шлака $c_2 = 1,269$ кДж/(кг·К). Коэффициент теплопроводности жидкого доменного шлака $\lambda_2 = 2$ Вт/(м·К) [16; 17]. Температура окончания затвердевания $T_{\text{с}} = 1165$ °С. Температура начала затвердевания $T_{\text{л}} = 1350$ °С. Температура фазового перехода $T_{\text{ф}} = 1275$ °С.

Решение сквозного уравнения (1) с граничными условиями (2)–(4) осуществляется методом конечных разностей по явной схеме аппроксимации производных. Температуры в фиктивных узлах в момент времени $\tau + \Delta\tau$ определяются по формулам:

$$T_{N+1} = \frac{(1 - \varepsilon) \cdot T_N + 2\varepsilon \cdot T_{\text{г}}}{1 + \varepsilon}; \varepsilon = \frac{\alpha \cdot \Delta r}{2\lambda_{\text{п}}};$$

$$T_0 = T_1,$$

где $\lambda_{\text{п}}$ – коэффициент теплопроводности доменного шлака при температуре поверхности $T_{\text{п}} = (T_{N+1} + T_N)/2$.

Граница перехода шлака из жидкого состояния в твердое определяются по температуре фазового перехода доменного шлака в цикле по $i = \overline{2 \dots N}$ из условия:

$$\text{если } T_{i-1} \geq T_{\text{ф}} \geq T_i; \text{ то } \varepsilon = \Delta r \left(i - \frac{3}{2} \right) + \Delta r \cdot \frac{T_{i-1} - T_{\text{ф}}}{T_{i-1} - T_i}.$$

Здесь i – номер узла расчетной сетки; Δr – приращение аргумента по координате. Приращение независимого аргумента по времени определяют по формуле

$$\Delta\tau = \Delta r^2 / (k_y \cdot \alpha),$$

где $k_{y \geq 6}$ – настроечный параметр; α – коэффициент температуропроводности шлака в i -узле.

Тестирование численного решения задачи путем оценки погрешности баланса теплоты в теле диаметром 3 мм показало, что $k_y=6$, $N=36$ и $\Delta T=35$ °C, $T_c=1265$ °C, $T_{\text{л}}=1300$ °C, $T_{\text{ф}}=1275$ °C.

Методика расчета траектории движения капли и относительной скорости

На жидкую каплю доменного шлака, движущуюся в закрученном газовом потоке, действуют силы инерции $\vec{F}_u$, силы аэродинамического сопротивления $\vec{F}_c$ и силы тяжести $\vec{F}_g$. Уравнения движения тела в проекциях на оси цилиндрической системы координат имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{dU_r}{d\tau} = \frac{U_\varphi^2}{r} + \frac{3}{4} \frac{c\rho_r}{\rho_2 D} (W_r - U_r) \cdot \sqrt{(W_r - U_r)^2 + (W_\varphi - U_\varphi)^2 + (W_z - U_z)^2}, \\ \frac{dU_\varphi}{d\tau} = \frac{U_r \cdot U_\varphi}{r} + \frac{3}{4} \frac{c\rho_r}{\rho_2 D} (W_\varphi - U_\varphi) \cdot \sqrt{(W_r - U_r)^2 + (W_\varphi - U_\varphi)^2 + (W_z - U_z)^2}, \\ \frac{dU_z}{d\tau} = \frac{3}{4} \frac{c\rho_r}{\rho_2 D} (W_z - U_z) \cdot \sqrt{(W_r - U_r)^2 + (W_\varphi - U_\varphi)^2 + (W_z - U_z)^2} + g. \end{cases} \quad (4)$$

Для расчета траектории движения капли система уравнений дополняется кинематическими соотношениями:

$$U_r = \frac{dr}{d\tau}; U_\varphi = \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{d\tau}; U_z = \frac{dz}{d\tau}. \quad (5)$$

Здесь U_r , U_φ , U_z – проекции вектора скорости капли на оси r , φ , z – цилиндрических координат; W_r , W_φ , W_z – проекции вектора скорости газа на оси цилиндрических координат; D – диаметр капли; c – коэффициент аэродинамического сопротивления капли потоку газа; g – ускорение свободного падения.

Относительная скорость капли и газового потока находится по выражению

$$W_{\text{отн}} = \sqrt{(W_r - U_r)^2 + (W_\varphi - U_\varphi)^2 + (W_z - U_z)^2}.$$

Решение обыкновенных дифференциальных уравнений (4) осуществлялось численным методом Рунге – Кутты [18–20].

Расчет максимального диаметра капли при дисковом распыле

Диаметр образующихся основных капелек, исходя из условия равенства действующих на капельку центробежной силы и силы поверхностного натяжения, выражается зависимостью [21]:

$$d = \frac{c}{\omega} \sqrt{\frac{\sigma}{R\rho_2}}, \quad (6)$$

где c – константа; R – радиус диска; σ – коэффициент поверхностного натяжения для жидкого доменного шлака, ω – угловая скорость вращения диска.

Справедливость соотношения (6) проверена различными исследованиями [21] в диапазоне изменения угловой скорости вращения диска от 30 до 1000 с^{-1} , радиусе диска от 10 до 110 мм, плотности жидкости от 300 до 1360 кг/м^3 , коэффициента поверхностного натяжения жидкости от 0,031 до 0,456 Н/м^2 и диаметра основных капелек от 0,03 до 4 мм. В этом диапазоне изменения параметров значения c варьировались от 1,9 до 4,6. Установлено, что c мало зависит от профиля кромки диска.

Расчеты диаметра капель проводились по соотношению (6), изменялись угловая скорость вращения диска, радиус диска, константа c принималась максимальной, коэффициент поверхностного натяжения примем равным $\sigma=0,6$ [16].

При увеличении радиуса диска от 0,1 до 0,3 м максимальный диаметр капли уменьшается от $6,85 \cdot 10^{-3}$ м до $9,9 \cdot 10^{-4}$ м. Угловая скорость вращения диска изменялась от 30 до 300 с^{-1} . Начальная скорость капли при отрыве от распылительного диска определялась по формуле $V_n = \omega \cdot R$. На рис. 3 представлена взаимосвязь угловой скорости вращения диска, радиуса капли и начальной скорости капли при отрыве от диска.

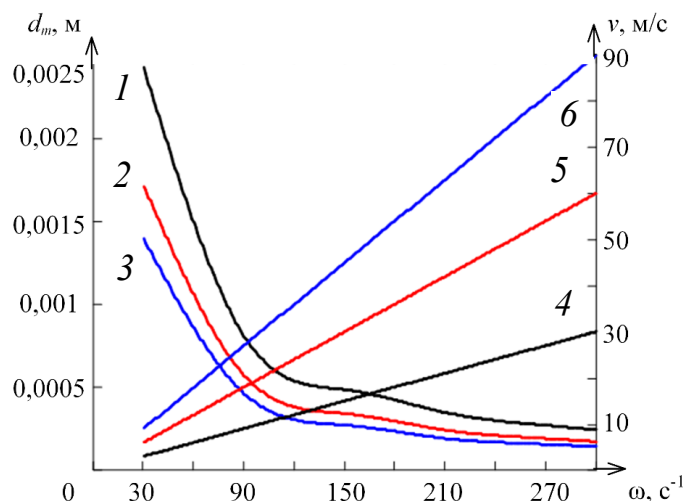


Рис. 3. Взаимосвязь угловой скорости вращения и радиуса капли и начальной скорости капли: 1, 2, 3 – радиус капли от угловой скорости вращения распылительного диска; 1 – радиус диска 0,1 м; 2 – радиус диска 0,2 м; 3 – радиус диска 0,3 м; 4, 5, 6 – начальные скорости капли от угловой скорости вращения распылительного диска; 4 – радиус диска 0,1 м; 5 – радиус диска 0,2 м; 6 – радиус диска 0,3 м

Из рисунка видно, что увеличение угловой скорости вращения и радиуса распылительного диска приводит к уменьшению радиуса получающихся капель. При этом начальная скорость капель возрастает.

Алгоритм расчета теплообмена капли доменного шлака при движении в закрученном потоке газа

На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма расчета теплообмена капли доменного шлака в закрученном потоке охлаждающего газа.

В блоке №1 задаются исходные данные.

В блоке №2 рассчитываются теплофизические характеристики доменного шлака.

В блоке №3 рассчитывается независимый аргумент по времени. В блоках №4–6 осуществляется выбор наименьшего шага по времени.



Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета теплообмена капли доменного шлака в закрученном потоке охлаждающего газа

В блоке №7 по выбранному диаметру распылительного диска и угловой скорости вращения диска рассчитывается максимальный диаметр капли.

В блоке №8 присваиваются начальные значения координат капли и начальной скорости капли.

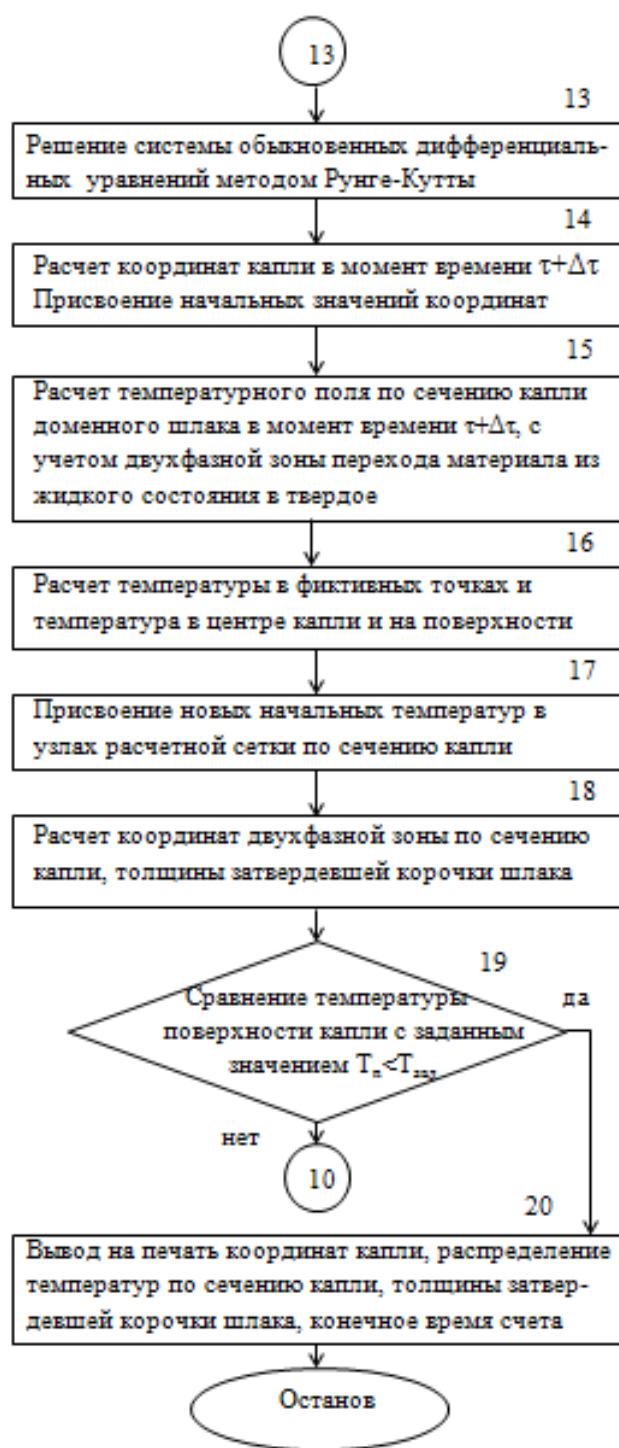


Рис. 4. Окончание

В блоке №9 проводится расчет проекций скоростей на оси цилиндрических координат закрученного газового потока. В блоке №10 рассчитывается относительная скорость капли. В блоке №11 производится расчет числа Рейнольдса. В блоке №12 рассчитывается коэффициент теплоотдачи за счет конвекции и теплового излучения. В блоке №13 осуществляется решение обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты. В блоке №14 расчет координат капли в момент времени $\tau + \Delta\tau$. Присвоение начальных значений координат капли потоке газа.

В блоке №15 производится расчет температурного поля по сечению капли доменного шлака в момент времени $\tau + \Delta\tau$, с учетом двухфазной зоны перехода материала из жидкого состояния в затвердевшее.

В блоках №16, 17 осуществляется расчет температур в фиктивных узлах и в центре и на поверхности капли. Присвоение новых начальных температур в узлах расчетной сетки по сечению капли.

В блоке №18 осуществляется расчет координат двухфазной зоны по сечению капли и толщины затвердевшей корочки шлака.

В блоках №19 проводится сравнение температур на поверхности капли с заданным значением. И если температура поверхности достигла заданного значения, в блоке №20 осуществляется вывод на печать координат капли, распределение температур по сечению капли, толщина затвердевшей корочки шлака, конечное время счета.

Расчет траекторий движения капли в закрученном потоке газа

Траектории движения капель в закрученном потоке газа позволяют определить характерные размеры грануляционной камеры, диаметр и высоту активной зоны. На рис. 5 представлены конечные координаты траектории капли в момент затвердевания поверхностного слоя. Начальная температура капли $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, конечная температура поверхности капли ниже температуры затвердевания материала капли.

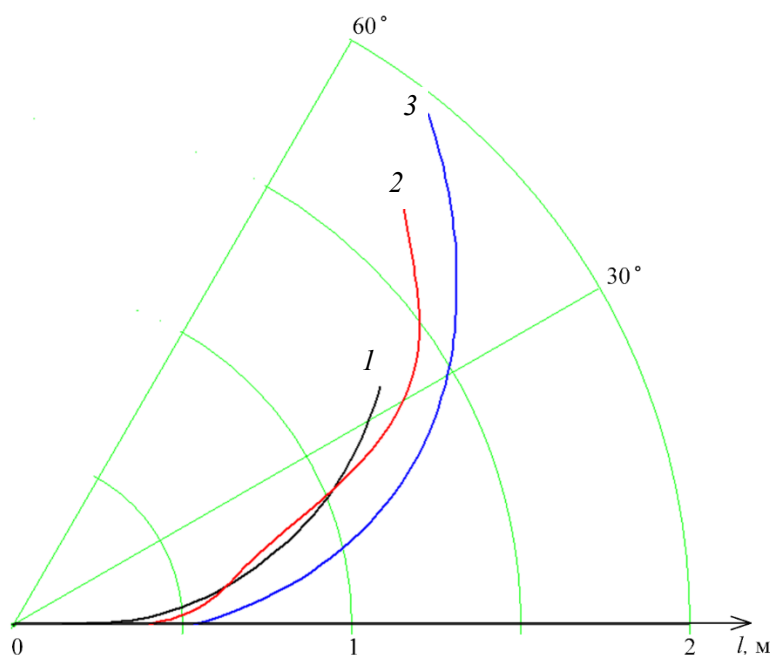


Рис. 5. Влияние диаметра распылительного диска на диаметр капель и траекторию капли до момента затвердевания внешнего слоя: 1 – $\omega = 30\text{ c}^{-1}$; $R = 0,1\text{ м}$; $r = 2,42 \cdot 10^{-3}\text{ м}$; $v_{\text{н}} = 3\text{ м/с}$; 2 – $\omega = 30\text{ c}^{-1}$; $R = 0,2\text{ м}$; $r = 1,71 \cdot 10^{-3}\text{ м}$; $v_{\text{н}} = 6\text{ м/с}$; 3 – $\omega = 30\text{ c}^{-1}$; $R = 0,3\text{ м}$; $r = 1,395 \cdot 10^{-3}\text{ м}$; $v_{\text{н}} = 9\text{ м/с}$. Температура охлаждающего газа равна $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Из рис. 5 видно, что с увеличением диаметра распыливающего диска начальная скорость капли растет, радиус капли уменьшается и уменьшается траектория капли в радиальном направлении до момента затвердевания поверхностного слоя.

Расчет температурных полей в капле при её охлаждении

На рис. 6 представлены температурные поля по сечению каплей доменного шлака в зависимости от диаметра при температуре охлаждающего газа 30 °С.

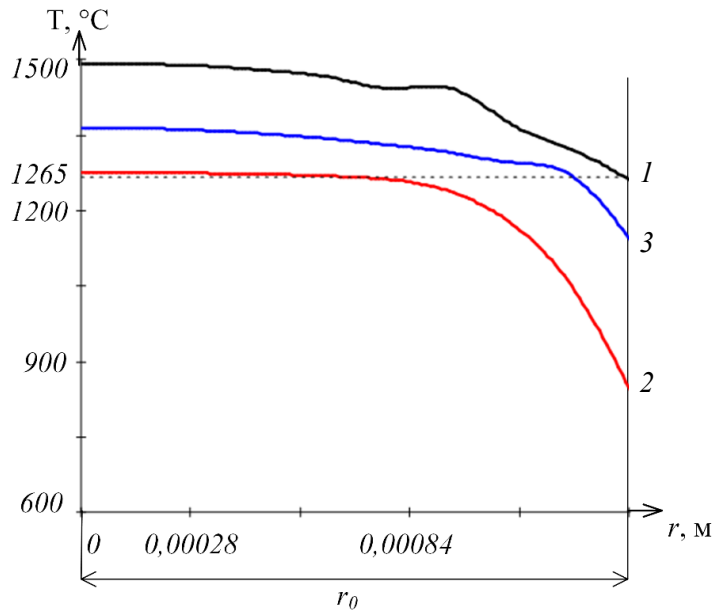


Рис. 6. Взаимосвязь диаметра капли и температурного поля капли до момента затвердевания внешнего слоя: 1 – $\omega = 30 \text{ с}^{-1}$; $R_D = 0,3 \text{ м}$; $v_n = 9 \text{ м/с}$; $r_0 = 1,395 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\tau = 0,195 \text{ с}$; $r = 2,025 \text{ м}$; 2 – 300 с^{-1} ; $R_D = 0,3 \text{ м}$; $v_n = 90 \text{ м/с}$; $r_0 = 1,395 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\tau = 1,747 \cdot 10^{-2} \text{ с}$; $r = 1,38 \text{ м}$; 3 – 300 с^{-1} ; $R_D = 0,3 \text{ м}$; $v_n = 90 \text{ м/с}$; $r_0 = 1,395 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\tau = 0,009 \text{ с}$; $r = 0,945 \text{ м}$

На рис. 6. представлены температурные поля по сечению капли диаметра, получающегося при распылении диском диаметром 0,3 м. При угловой скорости вращения 30 с^{-1} – линия 1, и угловой скорости вращения 300 с^{-1} – линия 2. Из рис. 6 видно, что в момент времени 1,747 с капля полностью затвердела (линия 2), радиус траектории равен 1,38 м, а в момент времени 0,009 с затвердевает верхний слой капли, внутри капля находится в жидком агрегатном состоянии, радиус траектории равен 0,945 м. При охлаждении капли до полного затвердевания радиус камеры распыления увеличивается. С увеличением диаметра распыливающего диска диаметры капель уменьшаются, а радиусы траекторий капель до момента затвердевания поверхностного слоя примерно одинаковы. С уменьшением температуры охлаждающего газа траектории капель уменьшаются.

Заключение

Для исследования траекторий движения жидкой капли доменного шлака в закрученном потоке холодного воздуха создана математическая модель теплообмена жидкой капли доменного шлака с учетом двухфазной зоны перехода материала из жидкого состояния в твердое. Получены температурные поля по сечению капель шлака различного диаметра. Температурные поля по сечению капель в момент образования твердой корочки шлака показывают, что имеется значительный градиент температуры и внутри материал капли находится в жидком агрегатном состоянии. С увеличением диаметра распыливающего диска и угловой скорости вращения диска уменьшаются размеры капель и продолжитель-

ность их охлаждения. При этом траектории капель (отклонения от центра камеры грануляции) в момент затвердевания внешнего слоя примерно одинаковы. При моделировании изменялись начальные скорости капель в зависимости от угловой скорости вращения распылительного диска и температуры охлаждающего газа. Получены координаты траектории капель в цилиндрической системе координат в момент появления затвердевшей корочки шлака, которые позволяют прогнозировать характерные размеры грануляционной камеры при проектировании установки, диаметр и высоту активной зоны цилиндрической камеры установки сухой грануляции доменного шлака. Предложен алгоритм расчета тепломассообмена капли доменного шлака в закрученном потоке охлаждающего газа с учетом двухфазной зоны перехода материала шлака из жидкого состояния в твердое.

Список литературы

1. New process for dry granulation and heat recovery from molten blast-furnace slag / S.J. Pickering, N. Hay, T.F. Roylance, G.H. Thomas // *Ironmaking and Steelmaking*. – 1985. – Vol.12, №.1. – P. 14–21.
2. A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry / H. Zhang, H. Wang, X. Zhu, Y. Qiu, K. Li, R. Chen, Q. Liao // *Applied Energy*. – 2013. – Vol. 112. – P. 956–966.
3. Схемы переработки металлургических шлаков / А.И. Гамей, В.В. Наумкин, Н.В. Сукинова, З.Н. Мурзина // *Сталь*. – 2007. – № 2. – С. 144–145.
4. Анализ работы доменных печей при высокой интенсивности плавки / С.В. Филатов, А.В. Лозович, В.Н. Титов, С.А. Загайнов, И.Ф. Курунов // *Металлург*. – 2017. – № 10. – С. 18–21.
5. Внедрение энергоэффективных решений при выплавке чугуна в ПАО «НЛМК» / С.В. Филатов, И.Ф. Курунов, В.Н. Титов, С.А. Загайнов // *Металлург*. – 2019. – № 4. – С. 25–28.
6. Barati, M. Energy recovery from high temperature slags / M. Barati, S. Esfahani, T.A. Utigard // *Energy*. – 2011. – Vol. 36(9). – P. 5440–5449.
7. Xie, D. Dry granulation to provide a sustainable solution for slag treatment / D. Xie, S. Jahanshahi, T. Norgate // *Sustainable Mining Conference*. – 17–19 August – 2010. – Kalgoorlie, WA, Australia. – P. 22–28.
8. Каппес, Х. Сухая грануляция шлака с утилизацией энергии – от рождения идеи до пилотной установки / Х. Каппес, Д. Мичелс // *Черные металлы*. – 2015. – № 5 (1001). – С. 46–52.
9. A Review of Granulation Process for Blast Furnace Slag / P. Yu, S. Wang, Y. Li, G. Xu // *MATEC Web of Conferences. The 3rd International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*. – Hong Kong, 2016. – Vol. 68. – P. 6–10.
10. О возможности использования теплового баланса доменной плавки для контроля тепловых потерь / О.П. Онорин, А.А. Полинов, А.В. Павлов, Н.А. Спирин, И.А. Гурин // *Металлург*. – 2018. – № 3. – С. 30–34.
11. Потери тепла с жидкими доменными шлаками и технические решения по их сокращению / Г.И. Урбанович, Е.Г. Урбанович, В.А. Панов, В.Ф. Воропаев, В.И. Басов // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2008. – № 7 (1303). – С. 51–56.
12. Теплообмен в грануляционной камере установки сухой грануляции шлака / С.В. Лукин, Н.И. Шестаков, Е.М. Ильичева // *Металлург*. – 2019. – № 8. – С. 36 – 41.

13. Математическая модель прогнозирования теплообмена одиночной капли доменного шлака при неустановившемся движении во встречном потоке газа / Н.Н. Синицын, Н.В. Запатрина, Ю.В. Донцова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 3. – С. 30–38.
14. Сабуров, Э.Н. Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве / Э.Н. Сабуров, С.В. Карпов; под ред. докт. техн. наук Э.Н. Сабурова. – М.: Экология, 1993. – 368 с.
15. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / Е.В. Аметилов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев [и др.]; под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
16. Юрьев, Б.П. Изучение теплофизических свойств доменных шлаков в процессе их термической обработки / Б.П. Юрьев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 11. – С. 5–10.
17. Казанцев, Е.И. Промышленные печи: справочник / Е.И. Казанцев. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
18. Калиткин, Н.Н. Численные методы: учебное пособие для вузов / Н.Н. Калиткин; под ред. А.А. Самарского. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
19. Амосов, А.А. Вычислительные методы для инженеров: учеб. пособие / А.А. Амосов, Ю.А. Дубинский, Н.В. Копченкова. – М.: Высш. шк., 1994. – 544 с.
20. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – 7-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 636 с.
21. Пажи, Д.Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М.: Химия, 1984. – 256 с.

References

1. Pickering S.J., Hay N., Roylance T.F., Thomas G.H. New process for dry granulation and heat recovery from molten blast-furnace slag. *Ironmaking and Steelmaking*. 1985, vol. 12, no. 1, pp. 14-21. – DOI 10.1179/030192385789944267.
2. Zhang H., Wang H., Zhu X., Qiu Y., Li K., Chen R., Liao Q. A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry. *Applied Energy*. 2013, vol. 112, pp. 956-966. – DOI 10.1016/j.apenergy.2013.02.019.
3. Gamei A.I., Naumkin V.V., Sukinova N.V., Murzina Z.N. Schemes for processing metallurgical slags. *Steel*. 2007, no. 2, pp. 144-145.
4. Analysis of blast furnace operation at high smelting intensity / S.V. Filatov, A.V. Lozovich, V.N. Titov, S.A. Zagainov, I.F. Kurunov. *Metallurgist*. 2017, no. 10, pp. 18-21.
5. Implementation of energy-efficient solutions in iron smelting at PJSC «NLMK» / S.V. Filatov, I.F. Kurunov, V.N. Titov, S.A. Zagainov. *Metallurgist*. 2019, no. 4, pp. 25-28.
6. Barati M., Esfahani S., Utigard T.A. Energy recovery from high temperature slags. *Energy*. 2011, vol. 36, no. 9, pp. 5440-5449. – DOI 10.1016/j.energy.2011.07.001.
7. Xie D., Jahanshahi S., Norgate T. Dry granulation to provide a sustainable solution for slag treatment. Proceedings of the Sustainable Mining Conference, 17-19 August 2010, Kalgoorlie, WA, Australia. 2010, pp. 22-28.
8. Kappes Kh., Michels D. Dry slag granulation with energy recovery - from the birth of an idea to a pilot plant. *Ferrous Metals*. 2015, no. 5 (1001), pp. 46-52.

9. Yu P., Wang S., Li Y., Xu G. A Review of Granulation Process for Blast Furnace Slag. *MATEC Web of Conferences. The 3rd International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), Hong Kong*. 2016, vol. 68, Art. 07002. – DOI 10.1051/mateconf/20166807002.
10. On the possibility of using the heat balance of blast furnace smelting to control heat losses / O.P. Onorin, A.A. Polinov, A.V. Pavlov, N.A. Spirin, I.A. Gurin. *Metallurgist*. 2018, no. 3, pp. 30-34.
11. Heat loss with liquid blast furnace slags and technical solutions for their reduction / G.I. Urbanovich, E.G. Urbanovich, V.A. Panov, V.F. Voropaev, V.I. Basov. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2008, no. 7 (1303), pp. 51-56.
12. Heat exchange in the granulation chamber of a dry slag granulation plant / S.V. Lukin, N.I. Shestakov, E.M. Il'icheva. *Metallurgist*. 2019, no. 8, pp. 36-41.
13. Sinitsyn N.N., Zapatrina N.V., Dontsova Iu.V. Mathematical model for predicting the heat exchange of a single blast furnace slag droplet during unsteady motion in a counter gas flow. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2022, vol. 18, no. 3, pp. 30-38. – DOI 10.36622/VSTU.2022.18.3.003.
14. Saburov E.N., Karpov S.V. Cyclone devices in woodworking and pulp and paper production]. Moscow, Ekologiya, 1993, 368 p.
15. Ametistov E.V., Grigor'ev V.A., Emtsev B.T. et al. Heat and mass transfer. Heat engineering experiment. Moscow, Energoizdat, 1982, 512 p.
16. Iur'ev B.P. Study of the thermophysical properties of blast furnace slags during their heat treatment. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 11, pp. 5-10.
17. Kazantsev E.I. Industrial furnaces. Moscow, Metallurgiya, 1975, 368 p.
18. Kalitkin N.N. Numerical methods. Moscow, Nauka, 1978, 512 p.
19. Amosov A.A., Dubinskii Iu.A., Kopchenova N.V. Computational methods for engineers. Moscow, Vysshaya shkola, 1994, 544 p.
20. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. Numerical methods. Moscow, BINOM. Laboratoriia znaniy, 2011, 636 p.
21. Pazhi D.G., Galustov V.S. Fundamentals of liquid spraying technology. Moscow, Khimiya, 1984, 256 p.