



УДК 669.162.212.9:669.162.211.1

DOI 10.17073/0368-0797-2025-3-316-323



Оригинальная статья

Original article

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОСТОЯНИЯ ГОРНА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАНИЙ ТЕРМОПАР, НАХОДЯЩИХСЯ В ПОЯСАХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ

А. Н. Дмитриев¹, Д. А. Витькин², М. О. Золотых¹, Г. Ю. Витькина¹

¹ Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

² АО «Калугин» (Россия, 620078, Екатеринбург, ул. Мира, 33)

✉ 20procents@mail.ru

Аннотация. Контроль футеровки горна доменной печи является важным аспектом в обеспечении эффективной и безопасной работы доменного производства. Футеровка горна играет ключевую роль в защите стен доменной печи от воздействия высоких температур и химически агрессивного шлакового расплава. Раннее выявление зон повышенного износа позволяет планировать профилактические работы, минимизируя простой и потери производительности. Более того, это способствует эффективному расходованию ресурсов, так как позволяет оптимизировать замену поврежденных участков футеровки, избегая излишних затрат на превентивные меры. В работе приведено описание разработанной трехмерной нестационарной модели горна доменной печи, базирующейся на показаниях термопар. Модель позволяет оценить форму разгара горна и распределение температур в кладке горна в трехмерной и двумерной (графической) формах. Для оценки разгара футеровки горна использованы показания термопар, установленных в районе трех нижних поясов холодильников. Указанная математическая модель может быть внедрена в доменный процесс в любое время после капитального ремонта I разряда. В случае, если прошло достаточно много времени после задувки доменной печи и в футеровке горна возможно образование разгара или гарнисажа, необходимо также использовать результаты ультразвукового контроля нижней части доменной печи. Математическая модель состояния горна доменной печи позволяет принимать пользователю обоснованные решения по предотвращению аварийных ситуаций, связанных с прогаром футеровки, и является перспективным инструментом для повышения эффективности и безопасной эксплуатации доменных печей.

Ключевые слова: доменная печь, горн, математическое моделирование, термопара, разгар, футеровка, контроль, теплопередача

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания Института металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН.

Для цитирования: Дмитриев А.Н., Витькин Д.А., Золотых М.О., Витькина Г.Ю. Математическая модель состояния горна доменной печи на основе показаний термопар, находящихся в поясах холодильников. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(3):316–323.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-3-316-323>

MATHEMATICAL MODEL OF BLAST FURNACE HEARTH CONDITION BASED ON DATA FROM THERMOCOUPLES IN REFRIGERATOR BELTS

A. N. Dmitriev¹, D. A. Vit'kin², M. O. Zolotych¹, G. Yu. Vit'kina¹

¹ Institute of Metallurgy named after Academician N.A. Vatolin, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsen Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

² JSC Kalugin (33 Mira Str., Yekaterinburg 620078, Russian Federation)

✉ 20procents@mail.ru

Abstract. The control of blast furnace hearth lining is of critical importance in ensuring efficient and safe operation of blast furnace production process. Hearth lining plays a fundamental role in protecting the blast furnace walls from high temperatures and chemically aggressive slag melt. Early detec-

tion of high wear areas allows planning of preventive maintenance, thereby minimizing downtime and lost productivity. Furthermore, it contributes to the efficient use of resources by optimizing the replacement of damaged lining sections, thus avoiding unnecessary expenditure on preventive measures. The paper presents a three-dimensional unsteady model of blast furnace hearth, developed based on thermocouple data. This model facilitates estimation of the crucible heat-up and temperature distribution in the crucible masonry in three-dimensional and two-dimensional (graphical) forms. Estimation of the hearth lining burnout is achieved through the utilization of readings of the thermocouples installed in the hearth lining of blast furnace in the area encompassing the three lower refrigerator belts. Implementation of the mathematical model is permissible at any juncture following the overhaul of the first discharge. If a sufficient amount of time passed since the blast furnace was blown in, and there is a possibility of burnout or skull formation in the hearth lining, it is also necessary to utilize the results of ultrasonic control (USC) of the blast furnace lower part. The mathematical model of the blast furnace hearth condition enables informed decision-making by users regarding prevention of the emergency situations related to lining burnout, thus demonstrating its potential as a tool for enhancing the efficiency and safe operation of blast furnaces.

Keywords: blast furnace, hearth, mathematical modelling, thermocouple, heating, lining, control, heat transfer

Acknowledgements: The work was performed within the framework of the State assignment of the Institute of Metallurgy named after Academician N.A. Vatolin, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Dmitriev A.N., Vit'kin D.A., Zolotikh M.O., Vit'kina G.Yu. Mathematical model of blast furnace hearth condition based on data from thermocouples in refrigerator belts. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(3):316–323. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-3-316-323>

ВВЕДЕНИЕ

Эффективный контроль разгара футеровки горна доменной печи (ДП) является неотъемлемой частью комплексной системы управления доменным производством, направленной на достижение высоких технико-экономических показателей.

Для контроля разгара футеровки горна ДП существует несколько способов:

- принципы системного анализа и решение прямой и обратной задач контроля тепловой работы ДП [1 – 3];
- систематическая диагностика состояния футеровки горна с использованием разработанного на фирме метода отраженного акустико-ультразвукового сигнала АУ-Е [4];
- метод группового учета аргументов, основным параметром в котором для оценки теплового состояния низа ДП принято содержание кремния в чугуна [5];
- оценка среднего теплового потока охлаждающей воды в холодильниках [6; 7];
- учет взаимосвязи между конструкцией футеровки горна и износом футеровки [8 – 10].

Одним из наиболее достоверных является способ, включающий в процессе капитального ремонта установку специальных термопар в определенном количестве и в определенных точках, что в дальнейшем позволит контролировать толщину футеровочных слоев и оценивать градиент температур в кладке [11 – 14]. Расчет остаточной толщины футеровки горна и лещади, а также их двух- и трехмерная визуализации осуществляются как с помощью известных программных пакетов (например, Matlab [15]), так и оригинальных программ [16 – 18]. Наиболее наглядным для моделирования теплового потока может считаться метод конечных элементов [19; 20].

Контроль состояния огнеупорной футеровки горна с использованием математической модели [21] возможен после задувки ДП и выхода ее теплового состояния на стационарный режим. Рассматриваемая в настоящей работе математическая модель может использоваться

в любое время после капитального ремонта I разряда. В случае, если прошло достаточно много времени после задувки, в футеровке горна возможно образование разгара или гарнисажа. Тогда необходимо использовать результаты ультразвукового контроля (УЗК) нижней части ДП.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

На рис. 1 представлен вертикальный разрез горна ДП объемом 2000 м³. Видно, что первый пояс холодильников охватывает большую часть лещади, а второй и третий расположены в зоне металлоприемника ДП.

Перед тремя поясами холодильников горна и лещади установлены термопары (20 шт. на каждом поясе). Для оценки разгара горна могут быть использованы данные с указанных термопар, которые имеются в базе данных АСУ ТП ДП (дискретность съема может составлять от 1 мин). Введено понятие эталонных температур термопар (ЭТТ) – это температуры с термопар, снятые в момент проведения УЗК разгара горна, результатом которого явились данные о толщине всех слоев футеровки на четырех горизонтах. В результате проведенного УЗК горна ДП устанавливается, что в поясе горна наблюдается износ керамических и углеродистых блоков, а также наличие гарнисажа. Горизонтальные разрезы выполнены на высоте 6,5; 7,3; 7,9; 9,9 м.

На рис. 2 приведен горизонтальный разрез горна с привязкой к фурменным приборам и леткам. Начало цилиндрической системы координат поместили в центр лещади на отметке 0. За начало отчета принята ось фурменного прибора 1 (рис. 2) и далее по часовой стрелке через равный угол. В данном случае высота будет постоянна и равна отметке секущей плоскости.

Таким образом, имеются четыре секущих плоскости, которые определяют геометрию гарнисажа. При помощи САД системы можно получить максимально точную 3D модель гарнисажа в горне.

В расчетную область задачи входят зона боковых стенок горна и зона лещади, где теплообмен описывается

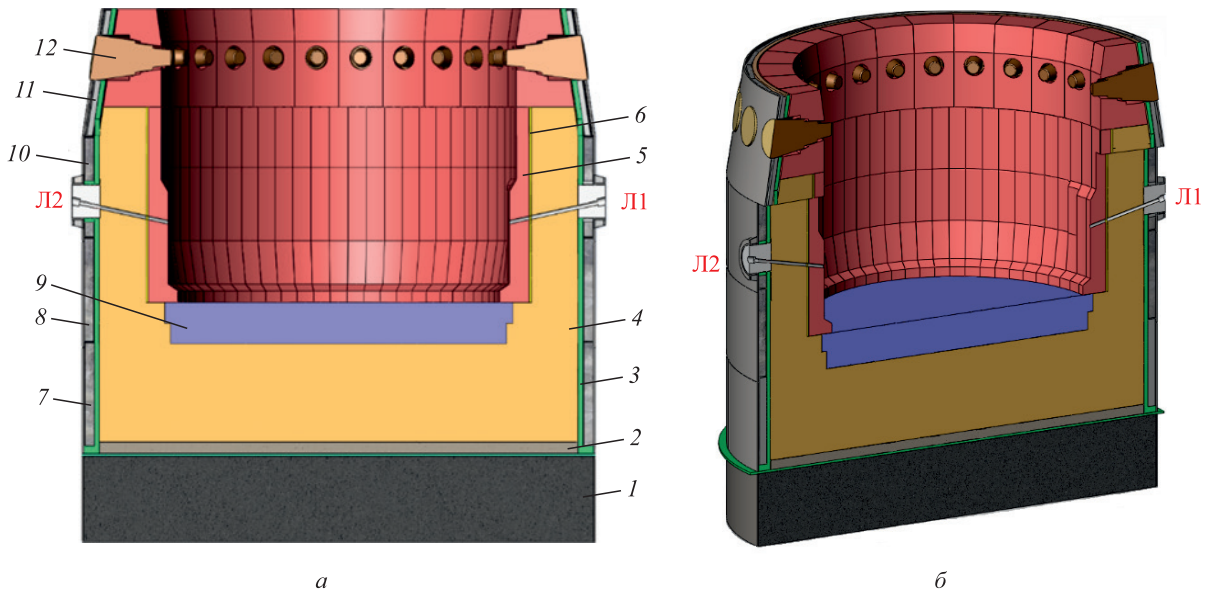


Рис. 1. Вертикальный разрез горна доменной печи, включая лещади:

2D-формат (а); 3D-формат (б):

- 1 – фундамент ДП; 2 – графитовые блоки; 3 – огнеупорная набивная масса; 4 – углеродистые блоки различной плотности;
5 – керамический стакан; 6 – огнеупорная изоляционная масса; 7 – холодильники (первый пояс);
8 – холодильники (второй пояс); 9 – керамический слой лещади; 10 – холодильники (третий пояс);
11 – холодильники (четвертый пояс); 12 – фурменные приборы; Л – летка

Fig. 1. Vertical section of the blast furnace hearth, including the bottom:

а – 2D-format; б – 3D-format:

- 1 – BF foundation; 2 – graphite blocks; 3 – refractory packing mass; 4 – carbon blocks of different density;
5 – ceramic cup; 6 – refractory insulating mass; 7 – refrigerators (1 belt); 8 – refrigerators (2 belt);
9 – ceramic layer of the bottom; 10 – refrigerators (3 belt); 11 – refrigerators (4 belt); 12 – tuyeres; Л – taphole

уравнением теплопроводности в твердом материале. Начальными условиями выступают известные данные последнего УЗК (эталонные температуры). Внутренней границей является поверхность контакта между

расплавленным металлом и футеровкой (гарнисажем). Температура внутренней поверхности футеровки принимается равной значению текущей температуры чугуна, измеренной термопарами, установленными в летке ДП, либо, при отсутствии термопар, задается оператором (например, 1450 °С). Внешней границей является значение температур по данным термопар в поясе холодильников. Допущено, что температура охлаждающего агента в холодильниках постоянна. Для упрощения расчета предположен идеальный тепловой контакт между слоями футеровки. В областях сопряжения теплофизические характеристики материалов усредняются.

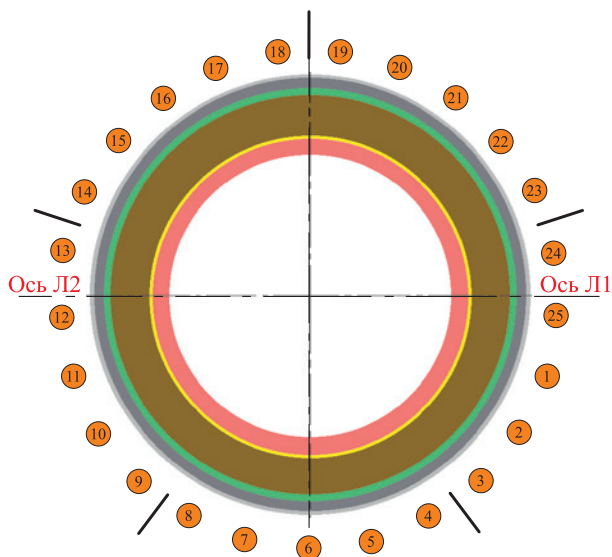


Рис. 2. Горизонтальный разрез горна с привязкой к 25 фурменным приборам и двум леткам

Fig. 2. Horizontal section of the furnace hearth with reference to 25 tuyeres and 2 tapholes

РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЧЕРЕЗ МНОГОСЛОЙНУЮ ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ СТЕНКУ

Расчет линейной плотности теплового потока через цилиндрическую стенку выполняли по формулам (1) – (3)

$$q = \frac{\pi(T_1 - T_2)}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}} = k_r \pi (T_2 - T_1) = \frac{\pi(T_2 - T_1)}{R_1}; \quad (1)$$

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}; \quad (2)$$

$$R_l = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}, \quad (3)$$

где T_1 и T_2 – температура горячего и холодного флюидов, °C (K); α_1 , α_2 – коэффициенты теплоотдачи от горячего флюида к стенке и от стенки к холодному флюиду, Вт/(м²·K); d_1 и d_2 – внутренний и наружный диаметры цилиндрической стенки, м; λ – коэффициент теплопроводности стенки, Вт/(м·K); k_l – линейный коэффициент теплопередачи через цилиндрическую стенку, Вт/(м·K); R_l – линейное термическое сопротивление теплопередачи через стенку цилиндрической формы, (м·K)/Вт.

Линейную плотность теплового потока при теплопередаче через цилиндрическую стенку, состоящую из n слоев разной толщины и с разными физическими свойствами, рассчитывали по формуле (4)

$$q = \frac{\pi(T_1 - T_2)}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}}, \quad (4)$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя, Вт/(м·K); d_i и d_{i+1} – внутренний и наружный диаметры i -го слоя цилиндрической стенки, м.

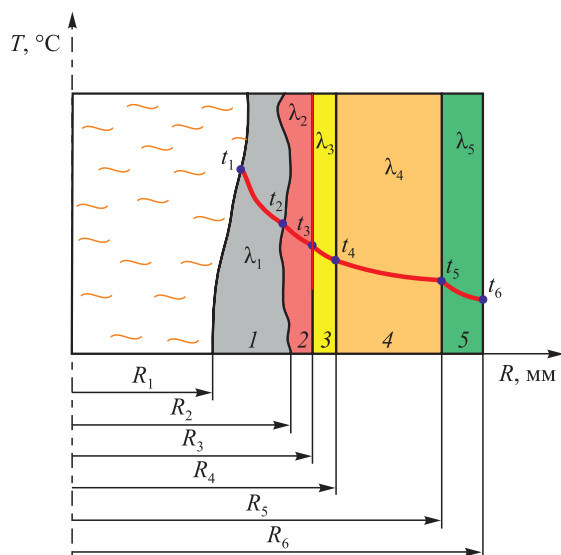


Рис. 3. Слои изоляционных материалов в области второго пояса холодильников:

1 – гарнисаж; 2 – керамический стакан;

3 – огнеупорная изоляционная масса;

4 – углеродистые блоки; 5 – огнеупорная набивная масса

Fig. 3. Layers of insulating materials

in the area of the second belt of refrigerators:

1 – skull; 2 – ceramic cup; 3 – refractory insulating mass;

4 – carbon blocks; 5 – refractory packing mass

Для этого случая теплопередачи через цилиндрическую стенку линейное термическое сопротивление равно

$$R_l = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}. \quad (5)$$

Расчет процесса теплопередачи через пятислойную стенку производили для четырех заданных горизонтов с известными толщинами слоев (например, для области, которую охватывает второй пояс холодильников эти слои указаны на рис. 3).

Поскольку имеет место разрушение керамического стакана и изоляционного материала, их толщины будут отличаться от исходных условий в рассматриваемом секторе контроля температуры (СКТ). Высота СКТ равна высоте холодильника. Если провести горизонтальные сечения вдоль СКТ, очевидно, что в каждой точке сечения температура огнеупорных материалов будет разная, а значит и разная глубина разрушения кладки (или толщина гарнисажа). Сектора контроля температуры разделены на равные части по высоте. В каждой секущей плоскости определены толщины всех слоев огнеупорных материалов, далее рассчитаны температуры в плоскости. Зная значение температуры, пропорционально определено, как будут вести себя соответствующие слои при повышении/снижении общей температуры.

Рассмотрим сечение, например, на высоте 6,5 м (рис. 4). Толщина гарнисажа различна в радиальном направлении (от $S_{(2-4)}$ до $S_{(1-3)}$). Возможно изменение координат точек T_1 и T_2 в следующих случаях:

– толщина гарнисажа увеличивается (T_1 и T_2 стремятся к центру ДП, температура в рассматриваемом секторе снижается);

– толщина гарнисажа уменьшается (T_1 и T_2 стремятся к T_3 и T_4 соответственно, температура будет расти).

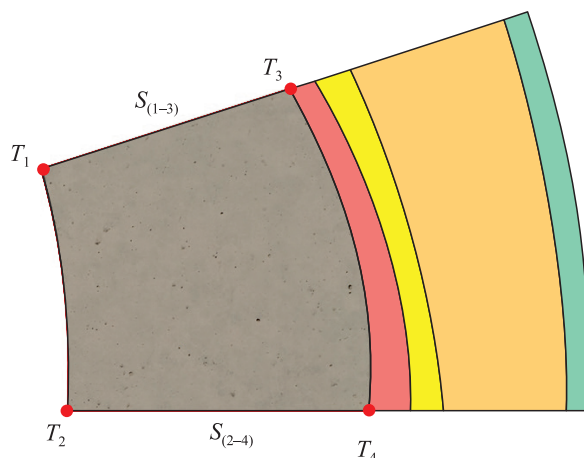


Рис. 4. Сектор контроля температуры в плоскости 6,5 м (вид снизу)

Fig. 4. Temperature control sector in the 6.5 m plane (bottom view)

Исходные данные для расчета

Input data for calculation

Изоляционный материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)	Толщина слоя, мм
Гарнисаж	0,36	X
Керамический стакан	4,0	340*
Изоляционный материал	4,0	60*
Супермикропористые углеродистые блоки	17	1282*
Набивная паста	18	130
Микропористые углеродистые блоки	11	1282*
Керамический слой лещади	1,74	Y
Супермикропористые углеродистые блоки лещади	17	650
Углеродистые блоки лещади	11	1950
Графитовые блоки лещади	100	295
Набивная паста лещади	18	70
* Значение до появления гарнисажа		

По данным температурам термопар в день проведения УЗК могут быть определены эталонные распределения температур в кладке горна на всех уровнях.

Коэффициент теплопроводности гарнисажа зависит от многих условий, среди которых есть плотность гарнисажа [22]. Принято $\lambda_r = 0,36$ Вт/(м·°C).

В таблице приведены исходные данные для расчета процесса теплопередачи.

РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЧЕРЕЗ МНОГОСЛОЙНУЮ ПЛОСКУЮ СТЕНКУ

Лещади анализируемой ДП состоит из семи плотно прилегающих друг к другу слоев. Для области, которую охватывает первый пояс холодильников, эти слои следующие (от внутреннего слоя к наружному): гарнисаж; керамический слой; супермикропористые углеродистые блоки; углеродистые блоки; графитовые блоки; набивная паста; воздушное охлаждение лещади (имеются термопары).

Первый пояс холодильников разделен на 20 одинаковых плоскостей (рис. 5, а). Секторы представлены на рис. 5, б.

Расчет теплопередачи через плоскую стенку выполнен с использованием поверхностной плотности теплового потока, которая, как известно, связана с тепловым потоком соотношением $q = Q/F$, где F – площадь поверхности теплообмена.

Для стенки, состоящей из n слоев, формула расчета теплопередачи через плоскую стенку имеет вид

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (6)$$

где δ_i и λ_i – толщина и коэффициент теплопроводности i -го слоя стенки; R_i – термическое сопротивление теплопередачи многослойной стенки, (м²·K)/Вт.

Тогда

$$R_t = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}; \quad (7)$$

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_t} = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta T_i}{\sum_{i=1}^k R_{ti}} = \text{const}, \quad (8)$$

где ΔT_i – перепад температур на i -ом участке теплопередачи, °C (K); R_{ti} – термическое сопротивление i -го

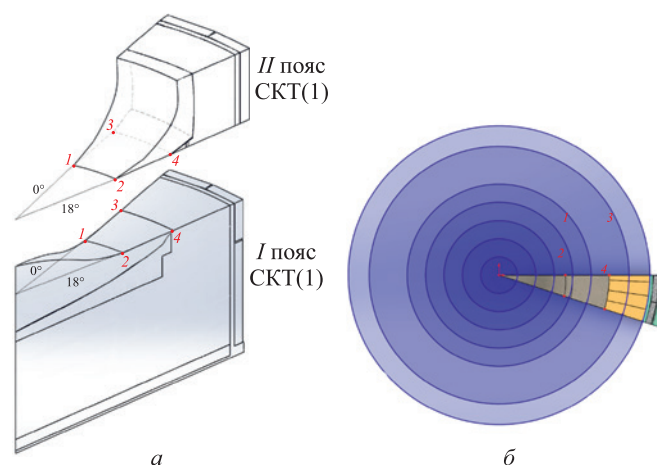
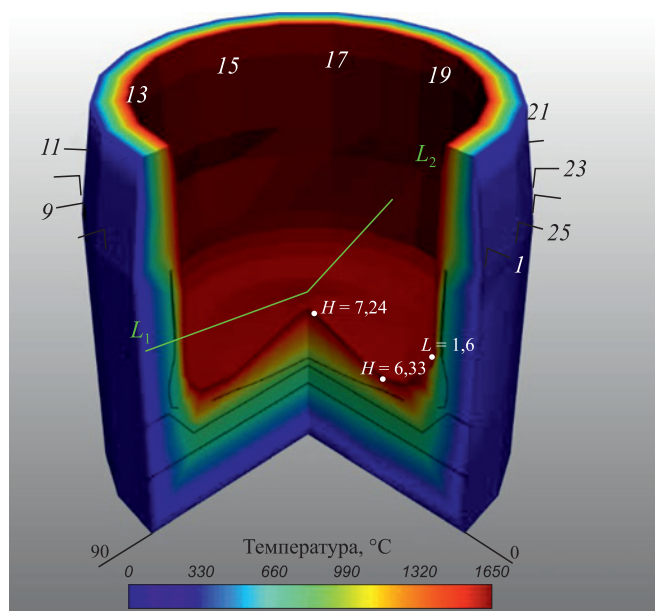
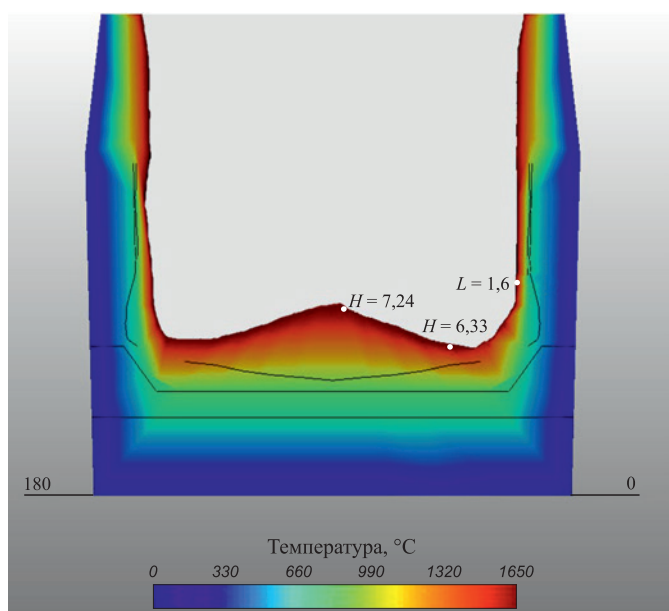


Рис. 5. Сечение секущими цилиндрическими плоскостями (а) и граничные точки гарнисажа двух поясов (б)

Fig. 5. Section by secant cylindrical planes (a) and boundary points of the skull of two belts (b)



а



б

Рис. 6. 3D модель горна и лещади (температурное распределение) (а); двумерный разрез модели горна и лещади (б)

Fig. 6. 3D model of the hearth and bottom (temperature distribution) (а), two-dimensional section of the hearth and bottom model (б)

участка теплопередачи, ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт; k – число участков теплопередачи.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГОРНА И ЛЕЩАДИ ДП

Двух- и трехмерная модели горна ДП визуализируются с помощью Visualization Toolkit (VTK) открытой библиотеки для моделирования, обработки изображений и прикладной визуализации, на C++.

Трехмерные объекты задаются наборами вершин и граней, проходящих через эти вершины. Данные модели являются квазителями вращения, поэтому координаты вершин задаются в цилиндрической системе координат. Центр этой системы отчета лежит на мнимой оси, проходящей вертикально через центр печи, начиная с отметки 0. В свою очередь VTK принимает координаты вершин фигур в прямоугольных координатах X , Y , Z . Для преобразования координат используются формулы: $X = R \cos(A)$; $Y = R \sin(A)$; $Z = H$.

Координаты вершин на внешней поверхности печи являются константами, заданными на этапе разработки модели. Координаты вершин на внутренней поверхности печи меняются в зависимости от толщины футеровки, вычисленной по математической модели разгара горна. Цвет отображения кладки представляет собой цветовой градиент, соответствующий температуре футеровки (рис. 6).

Для наглядности отображения в трехмерном представлении горна может быть вырезан любой сектор. Это позволяет оценить внутреннее состояние стенки, при этом азимуты, по которым производится сечение могут быть заданы произвольно, что позволяет контролировать

весь объем кладки. Торцы сечения не являются результатом работы VTK по рассечению фигуры, а являются отдельным, специально вычисленным множеством точек. Таким образом, для каждого отображения задаются четыре поверхности: внешняя (константа), внутренняя (расчет) и два азимутальных сечения (расчет).

Достоверность прогноза остаточной толщины футеровки стенок горна ДП определяется сравнением результатов расчета в модели с результатами проведенных мероприятий УЗК.

Выводы

Применение разработанной математической модели позволит оптимизировать процесс доменной плавки, обеспечивая оперативный контроль толщины футеровки посредством визуализации горна и лещади. Это, в свою очередь, откроет путь к существенному сокращению издержек благодаря своевременному принятию решений о технологических параметрах процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Чайка А.Л., Лебедь В.В., Сохацкий А.А., Цюпа К.С., Корнилов Б.В., Шостак В.Ю., Панчоха Г.В., Москалина А.А., Гоман С.В., Фоменко А.П. Опыт и перспективы комплексного применения систем автоматизированного контроля разгара футеровки, тепловых потерь и теплоэнергетических параметров на доменных печах. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017;(3):2–9.
Chaika A.L., Lebed' V.V., Sokhatskii A.A., Tsyupa K.S., Kornilov B.V., Shostak V.Yu., Panchokha G.V., Moskalina A.A., Goman S.V., Fomenko A.P. Experience and prospects of complex application of automated control systems of the lining firing, heat losses and thermoenergetic parameters on blast furnaces. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017;(3):2–9.

- lina A.A., Goman S.V., Fomenko A.P. Experience and prospects of complex application of automated control systems for lining burnout, heat losses and heat energy parameters at blast furnaces. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2017;(3):2–9. (In Russ.).
2. Пинчук Д.А., Панчоха Г.В., Канаев В.В., Можаренко Н.М. Современные методы контроля остаточной толщины футеровки металлоприемника доменной печи: *Сборник научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. 2005;(11):247–253.
3. Филатов С.В., Курунов И.Ф., Гордон Я.М., Тихонов Д.Н., Грачев С.Н. Продление кампании доменной печи при ее интенсивной работе. *Металлург*. 2016;(9):17–22.
Filatov S.V., Kurunov I.F., Gordon Ya.M., Tikhonov D.N., Grachev S.N. Extension of blast furnace campaign at its intensive operation. *Metallurg*. 2016;(9):17–22. (In Russ.).
4. Тараканов А.К., Иващенко В.П., Еремин О.О., Сибир А.В., Лялюк В.П., Кассим Д.А. Контроль состояния футеровки металлоприемника доменной печи. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016;(2):32–38.
Tarakanov A.K., Ivashchenko V.P., Eremin O.O., Sibir A.V., Lyalyuk V.P., Kassim D.A. Control of condition of lining in blast furnace metal receiver. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2016;(2):32–38. (In Russ.).
5. Муравьева И.Г., Тогобицкая Д.Н., Белошадка Е.А., Шумельчик Е.И., Семенов Ю.С. Разработка комплексного критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника доменной печи: *Сборник научных трудов «Системные технологии»*. 2012;(2):79.
6. Jiao K.-x., Zhang J.-l., Liu Z.-j., Deng Y., Chen C.-l. Cooling phenomena in blast furnace hearth. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2018;25:1010–1016.
<https://doi.org/10.1007/s42243-018-0160-x>
7. Andreev K., Louwerse G., Peeters T., van der Stel J. Blast furnace campaign extension by fundamental understanding of hearth processes. *Ironmaking & Steelmaking*. 2017;44(2): 81–91. <https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1154716>
8. Liu Z Recent progress on long service life design of Chinese blast furnace hearth. *ISIJ International*. 2012;52(101): 1713–1723. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1713>
9. Li Y., Chen L., Wang L., Ma J. Monitoring the safety status of a blast furnace hearth using cooling stove heat flux. *AIP Advances*. 2020;10(2):025308.
<https://doi.org/10.1063/1.5137827>
10. Dmitriev A.N., Chesnokov Yu.A., Chen K., Ivanov O.Yu., Zolotykh M.O. Monitoring system of firebrick lining erosion of blast furnace hearth. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013;46(16):294–301.
<https://doi.org/10.3182/20130825-4-US-2038.00027>
11. Дмитриев А.Н., Золотых М.О., Витькина Г.Ю. Мониторинг состояния огнеупорной футеровки горна доменной печи на основе цифровых технологий. Екатеринбург: АМБ;2022:154.
12. Пат. 2299910 RU. Способ контроля состояния футеровки горна доменной печи. Кошелев А.Е., Криволапова Л.И., Кравцова О.А.; заявлено 07.07.2005; опубликовано 27.05.2007.
13. Torrkulla J., Saxén H. Model of the state of the blast furnace hearth. *ISIJ International*. 2000;40(5):438–447.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.438>
14. Duarte R.M., Ruiz-Bustinza I., Carrascal D., Verdeja L.F., Mochón J., Cores A. Monitoring and control of hearth refractory wear to improve blast furnace operation. *Ironmaking & Steelmaking*. 2013;40(5):350–359.
<https://doi.org/10.1179/1743281212Y.0000000045>
15. Swartling M., Sundelin B., Tilliander A., Jönsson P.G. Heat transfer modelling of a blast furnace hearth. *Steel Research International*. 2010;81(3):186–196.
<https://doi.org/10.1002/srin.200900145>
16. Swartling M. A study of the heat flow in the blast furnace hearth lining: Doctoral dissertation. 2010:51.
17. Li Y., Chen L., Ma J. Numerical study on the relationship between the localized depression erosion of a commercial blast furnace hearth lining and the heat flux of cooling staves. *IEEE Access*. 2019;(7):60984–60994.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2915915>
18. Swartling M., Sundelin B., Tilliander A., Jönsson P. Experimentally determined temperatures in blast furnace hearth. *Ironmaking & Steelmaking*. 2010;37(1):21–26.
<https://doi.org/10.1179/030192309X12506804200627>
19. Zhao H., Cheng S. Optimization for the structure of BF hearth bottom and the arrangement of thermal couples. *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*. 2006;13(6):497–503.
[https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(06\)60101-1](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(06)60101-1)
20. Zhang C., Hou B., Shao L., Zou Z., Saxén H. Estimation of the blast furnace hearth state using an inverse-problem-based wear model. *Metals*. 2022;12(8):1302.
<https://doi.org/10.3390/met12081302>
21. Дмитриев А.Н., Золотых М.О., Чэнь К., Витькина Г.Ю. Сравнительный технологический анализ систем контроля разгара огнеупорной футеровки горна доменной печи. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018;(8):82–91.
Dmitriev A.N., Zolotykh M.O., Chen K., Vit'kina G.Yu. Comparative technological analysis of control systems of refractory lining heat-up of blast furnace hearth. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2018;(8):82–91. (In Russ.).
22. Мороз В.Ф., Тогобицкая Д.Н., Можаренко Н.М., Нестеров А.С., Белькова А.И., Степаненко Д.А. Влияние состава и свойств материалов гарнисажа на его образование и стойкость: *Сборник научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. 2010;22:85–95.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Андрей Николаевич Дмитриев, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0001-6446-0215

E-mail: andrey.dmitriev@mail.ru

Дмитрий Александрович Витькин, инженер-конструктор, АО «Калугин»

ORCID: 0009-0004-7023-5734

E-mail: dimantg85@rambler.ru

Максим Олегович Золотых, к.т.н., ведущий инженер лаборатории пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-8923-9872

E-mail: max@zolotykh.su

Галина Юрьевна Витькина, к.т.н., ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-1076-2709

E-mail: 20procents@mail.ru

Andrei N. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy named after Academician N.A. Vatolin, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0001-6446-0215

E-mail: andrey.dmitriev@mail.ru

Dmitrii A. Vit'kin, Design Engineer, JSC Kalugin

ORCID: 0009-0004-7023-5734

E-mail: dimantg85@rambler.ru

Maksim O. Zolotykh, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer of Laboratory for Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy named after Academician N.A. Vatolin, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0009-0004-7023-5734

E-mail: max@zolotykh.su

Galina Yu. Vit'kina, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy, Institute of Metallurgy named after Academician N.A. Vatolin, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-1076-2709

E-mail: 20procents@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. Н. Дмитриев – идея, научное руководство, разработка методологии исследования, рецензирование и редактирование рукописи.

Д. А. Витькин – проведение расчетов, анализ, обработка данных и их обсуждение, написание алгоритма расчета, визуализация результатов.

М. О. Золотых – написание алгоритма расчета, программирование, визуализация 2D и 3D результатов.

Г. Ю. Витькина – концептуализация, подготовка обзора и редактирование текста, анализ и обработка данных, написание окончательного варианта рукописи.

A. N. Dmitriev – conceptualization, scientific guidance, development of the research methodology, review and editing of the text.

D. A. Vit'kin – performing calculations, analysis, data processing and discussion, writing the calculation algorithm, visualizing the results.

M. O. Zolotykh – writing the calculation algorithm, programming, visualizing 2D and 3D results.

G. Yu. Vit'kina – conceptualization, review preparation and text editing, data analysis and processing, writing the final manuscript.

Поступила в редакцию 16.01.2025

После доработки 12.02.2025

Принята к публикации 23.04.2025

Received 16.01.2025

Revised 12.02.2025

Accepted 23.04.2025