



УДК 669.162.2.004.896

А.З. ЖУЧЕНКО, заместитель директора структурного подразделения,

А.И. КРИВОНОСОВ, докт. техн. наук, профессор, начальник отдела,

В.К. КИТЧЕНКО, заместитель генерального директора, А.Л. КАНЕВСКИЙ, к.т.н., ведущий научный сотрудник,

А.Е. КРИВОЛАПОВ, главный конструктор, Е.Н. ГУРЫЛЕВ, инженер

Украинский государственный научно-технический центр «Энергосталь» (УкрГНТЦ «Энергосталь»), г. Харьков

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Разработана информационная система, с помощью которой можно визуальна оценить тепловое состояние периферийной зоны доменной печи, а также состояние ее ограждения на основании информации, полученной от датчиков системы испарительного охлаждения шахты и заплечиков. Данная система реализована в составе АСУ ТП доменной печи №6 ОАО «АрселарМиттал Кривой Рог».

Ключевые слова: доменная печь, профиль рабочего пространства, гарнисаж, мониторинг, неравномерность хода, интерполяция, обратная задача теплообмена, оптимизация энергопотребления.

Профиль рабочего пространства – важная характеристика доменной печи, определяющая распределение шихтовых материалов и газового потока в ее объеме, распределение тепловых нагрузок на холодильные плиты и температуру кладки печи. Ключевой особенностью профиля рабочего пространства является его изменчивость во времени – изначальная огнеупорная футеровка практически полностью разрушается в течение 9–15 месяцев после начала работы печи, остальную часть кампании печь работает на «гарнисажном» режиме, т.е. в качестве теплоизолятора выступает гарнисаж – затвердевший конгломерат из шихтовых материалов. Управляя технологическим процессом, обслуживающий персонал печи может корректировать профиль рабочего пространства, но лишь при наличии объективной информации о его геометрических характеристиках [1, 2, 3, 4].

В разработанной информационной системе толщина кладки/гарнисажа рассчитывается на основании значений температур, полученных от датчиков, установленных в 170 холодильных плитах, охватывающих зону заплечиков и большую часть шахты (рис. 1). Для определения температурного поля холодильных плит было решено уравнение теплопроводности при задании граничных условий, теплофизических параметров, а также геометрических характеристик. Холодильные плиты рассматривались как многослойная охлаждаемая стенка, содержащая кладку, засыпку, холодильник, в котором расположены два змеевика, набивку и кожух доменной печи.

Для определения стационарного температурного поля в расчетном сечении плиты решается уравне-

ние теплопроводности со следующими граничными условиями:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0; \quad (1)$$

- на поверхности холодильной плиты, обращенной в доменную печь, условия теплообмена между чугуном или газом и холодильной плитой

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_r \cdot (T_r - T)|_{x=a}; \quad (2)$$

- на наружной поверхности холодильной плиты

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_{\text{эф}} \cdot (T_{\text{пов}} - T)|_{x=0}, \quad (3)$$

где

$$\alpha_{\text{эф}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{пов}}} + \frac{h_{\text{кож}}}{\lambda_{\text{к}}} + \frac{h_{\text{наб}}}{\lambda_{\text{наб}}}}; \quad (4)$$

- на торцевых поверхностях холодильной плиты тепловой поток отсутствует

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} &= 0; \\ \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=b} &= 0; \end{aligned} \quad (5)$$

- на поверхностях охлаждающих трубок – условия теплообмена между поверхностью холодильной плиты и водой

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_{\text{воды}} \cdot (T - T_{\text{воды}}), \quad (6)$$

где n – нормаль к поверхности трубок;
 $T(x, y)$ – температура холодильной плиты, °С;
 x, y – координаты, м;
 $\alpha_r, \alpha_{\text{воды}}$ – коэффициенты теплоотдачи от газа к кладке или холодильной плите и от воды к холодильной плите, Вт/м², К;
 $\alpha_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи от воздуха к холодильной плите с учетом кожуха и набивки между кожухом и холодильной плитой, Вт/м², К;
 $T_r, T_{\text{воды}}$ – соответствующие температуры газа и воды, °С;
 a, b – толщина и ширина холодильной плиты, м;
 $h_{\text{кож}}, h_{\text{наб}}$ – толщина кожуха и набивки, м.

Система дифференциальных уравнений (1)–(6) решается методом конечных разностей, в результате чего эти уравнения с помощью метода сеток сводятся к системе алгебраических уравнений, которые решаются методом матричной прогонки.

Результатом решения задачи является распределение температуры в расчетной области и, как частное значение, температуры в точке установки датчика. Таким образом, решая задачу теплопроводности, получаем набор значений температуры в контрольной точке как функции от толщины кладки.

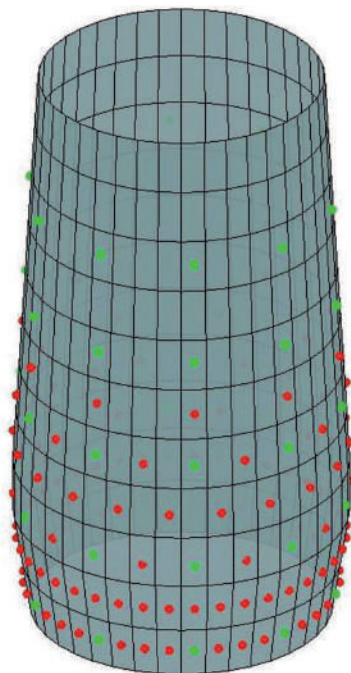


Рисунок 1 – Расположение датчиков температуры в холодильных плитах доменной печи (красным отмечены датчики, установленные в холодильных плитах, зеленым – в плитах и кожухе)

Расчет уравнения теплопроводности производится в двумерной области для всех пяти типов холодильных плит, отличающихся конструктивно. Граничные условия выбираются следующим образом: со стороны печи температура газа задается по экспериментальным данным как функция от высоты печи; температура охлаждающей воды, коэффициенты теплоотдачи для газа, воды и окружающего воздуха – рассчитываемые характеристики.

Полученные результаты представляют собой семейство кривых зависимости температуры в контрольной точке от толщины кладки для различных рядов (рис. 2).

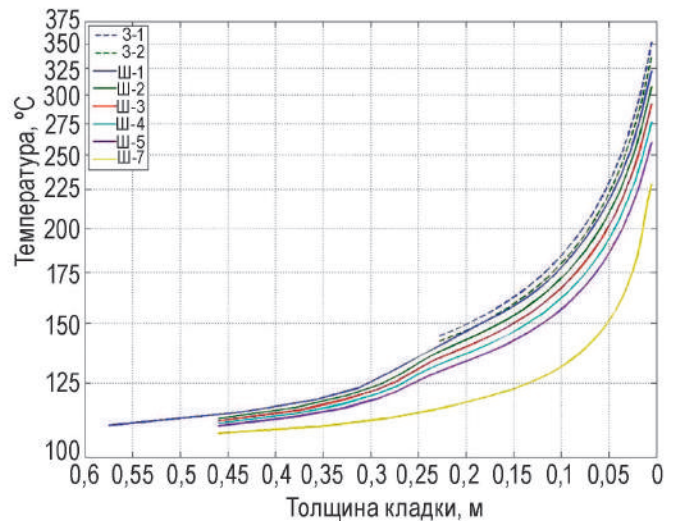


Рисунок 2 – Семейство кривых зависимости температур в контрольных точках от толщины кладки (3 – ряд заплечиков, Ш – ряд шахты)

Обратные функции – т.е. функции зависимости толщины кладки от температуры в контрольных точках – получаются простой инверсией зависимостей, представленных на рис. 2, и являются базовыми для определения толщины кладки в информационной системе. Кроме того, при решении задачи теплопроводности рассчитываются следующие параметры как функции от толщины кладки:

- температуры внутренней и внешней грани холодильной плиты;
- температуры в плоскостях первого и второго змеевиков;
- тепловая нагрузка на холодильную плиту.

Данные параметры обеспечивают операторов дополнительной диагностической информацией (например, достижение температуры внутренней грани холодильной плиты 600 °С указывает на порог механической прочности чугуновой плиты).

Кроме датчиков температуры холодильных плит и кожуха, в информационной системе используется информация от датчиков расхода и температуры охлажда-



дающей воды в индивидуальных циркуляционных контурах. На основании этой информации рассчитываются следующие параметры:

- нагрев воды в индивидуальных циркуляционных контурах;
- тепловая нагрузка на каждый охлаждающий контур, каждый вертикальный ряд холодильных плит (сумма тепловых нагрузок трех охлаждающих контуров), а также суммарная тепловая нагрузка СИО шахты и запечиков.

Информационная система представляет собой компьютерную программу, разработанную в среде MATLAB компании MathWorks и работающую в режиме «мягкого» реального времени без выдачи управляющих воздействий. Интервал считывания входной информации, расчета, визуализации и архивирования составляет 1 минуту.

Главный видеокادر информационной системы представлен на рис. 3.

Особенностью информационной системы мониторинга тепловых полей доменной печи является прин-

цип визуализации параметров на развертке печи, представляющей собой прямоугольную сетку холодильных плит с указанием расположения датчиков температуры. Этот принцип состоит в отображении распределения параметров на площади развертки. К таким параметрам относятся:

- температура холодильных плит;
- температура кожуха;
- тепловая нагрузка на холодильные плиты;
- износ кладки.

В основе расчета распределения параметра – метод интерполяции на неравномерной сетке (сетке установленных датчиков температуры), который является одной из стандартных функций MATLAB, при этом величина параметра отображается цветом из соответствующей цветовой шкалы. Кроме непрерывного варианта отображения, существует также дискретный вариант, представленный на рис. 4.

В зависимости от диапазона отображаемого параметра предусматривается два режима задания границ:

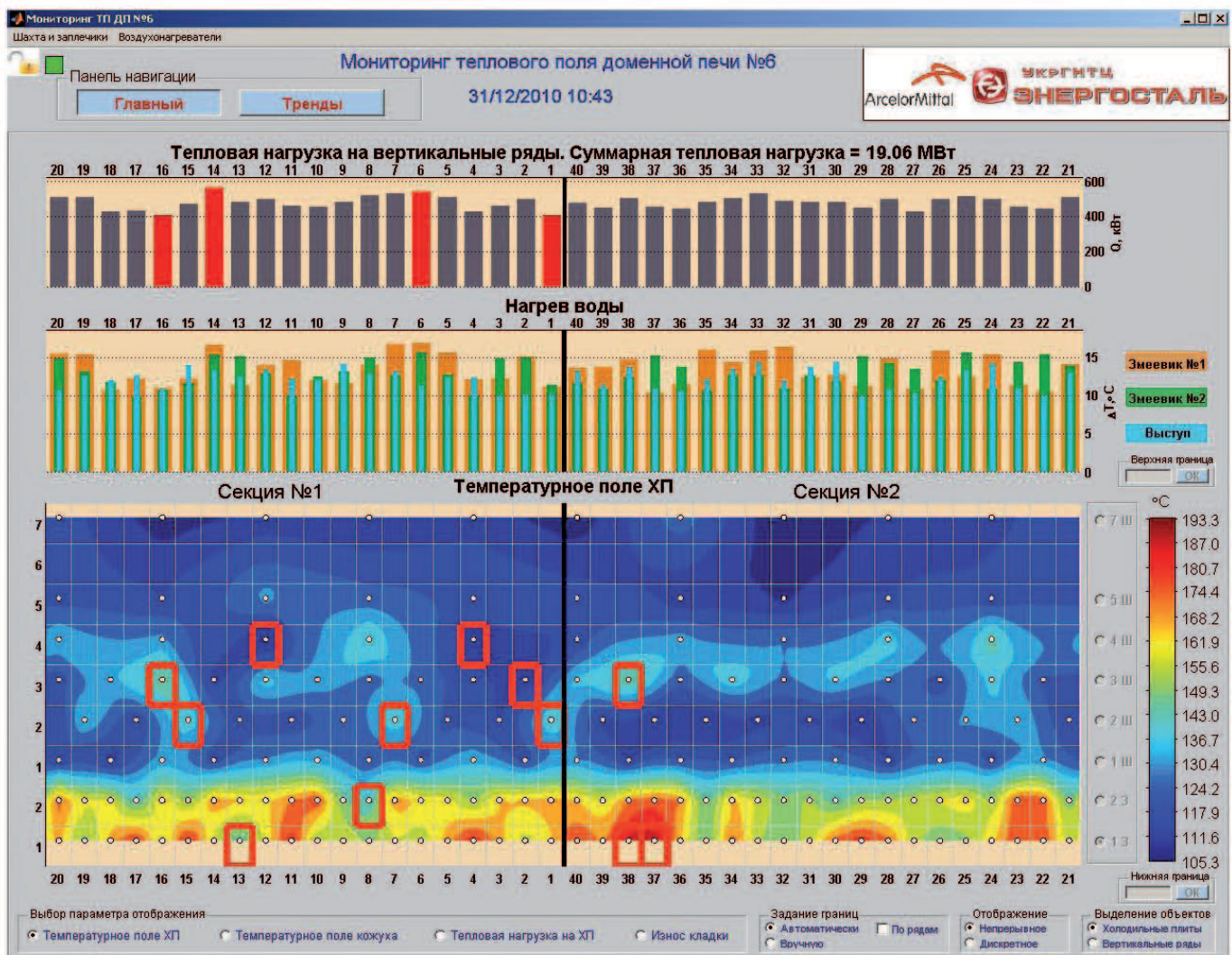


Рисунок 3 – Главный видеокادر информационной системы

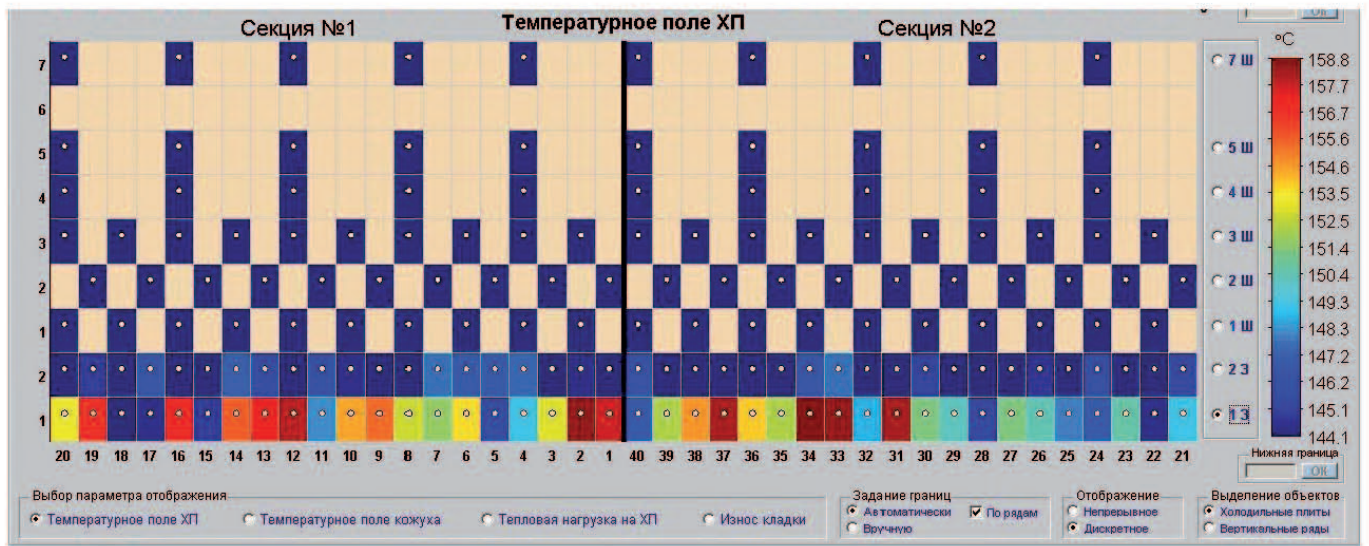


Рисунок 4 – Дискретное отображение. Задание границ – автоматическое (по рядам)

- автоматический – диапазон шкалы устанавливается в зависимости от минимального и максимального значений отображаемого параметра (как для всех значений развертки, так и для каждого ряда в отдельности), где установлены датчики температуры;
- ручной – диапазон шкалы устанавливается пользователем вручную.

Используя вышеперечисленные режимы, операторы смогут отслеживать реальное состояние параметров (как в масштабе всей зоны измерений, так и в отдельных рядах).

Так как зависимость температуры от толщины кладки не является линейной функцией, актуален вопрос о чувствительности системы к изменению толщины кладки на начальном этапе (кладка целая) и на конечном (кладка отсутствует). Для первого ряда запечки чувствительность изменяется от 1,8 °C/см до 51,6 °C/см, для седьмого ряда шахты – от 0,2 °C/см до 24,6 °C/см.

Из анализа следует, что при целой кладке чувствительность имеет один порядок с погрешностью измерительного канала, а при уменьшении толщины кладки чувствительность значительно возрастает, что повышает надежность идентификации аномальных/аварийных зон ограждения печи.

Для обнаружения аномальных зон в информационной системе предусмотрена индикация: для параметров развертки – индикация плит, в которых параметр отличается от среднего значения по данному ряду на 10 %; для тепловых нагрузок на вертикальные ряды – индикация рядов, в которых тепловая нагрузка также отличается на 10 % от среднего значения (рис. 3) [5, 6, 7].

Основным недостатком определения толщины кладки данным методом является неоднозначность получаемого результата. Температура в контрольной точ-

ке зависит и от толщины кладки и от температуры газа, но в расчетах последний параметр задается постоянным для каждого ряда. Таким образом, при изменении температуры газа информационная система определит эквивалентное изменение толщины кладки. Однако процессы изменения толщины кладки и температуры газа протекают в разных временных масштабах, поэтому для идентификации ситуации необходим анализ значений толщины кладки, рассчитываемой информационной системой во временной и частотной областях на протяжении кампании печи. Необходимо отметить, что температуру газа для каждой холодильной плиты предполагается определить при наладке системы мониторинга в начале кампании доменной печи, что исключит в дальнейшем неоднозначность получаемых результатов.

ВЫВОДЫ

Создана математическая модель холодильной плиты в двумерной области, позволяющая определить ряд параметров теплового поля (в т.ч. температуру в контрольной точке) в зависимости от толщины участка кладки, соответствующего данной холодильной плите.

Разработана информационная система мониторинга теплового поля шахты и запечки доменной печи на базе MATLAB, в основу которой положен принцип качественной интерпретации информации, позволяющий оценить распределение тепловой нагрузки на холодильные плиты доменной печи.

Разработанная система мониторинга позволяет принимать оптимальные решения по ведению технологического процесса работы доменной печи.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кудинов, Г.А.** Охлаждение современных доменных печей / Г.А. Кудинов. – М. : Metallurgy, 1988. – 254 с.
2. **Андо́ньев, С.М.** Испарительное охлаждение металлургических печей / С.М. Андо́ньев. – М. : Metallurgy, 1970. – 424 с.
3. **Плискановский, С.Т.** Неполадки в работе доменных печей / С.Т. Плискановский. – Днепропетровск : Пороги, 2002. – 303 с.
4. **Вегман, Е.Ф.** Металлургия чугуна / Е.Ф. Вегман. – М. : Академкнига, 2004. – 774 с.
5. **Бородулин, А.В.** Мониторинг и теплотехнический анализ выдувки доменной печи объемом 5000 м³ с применением азота / А.В. Бородулин // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – Дніпропетровськ : ІЧМ НАН України, 2009. – С. 11–23.
6. **Shinroku Matsuzaki.** Development of Visual Evaluation and Numerical Analysis System of Blast Furnace / Shinroku Matsuzaki. // NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT. – 2004. – № 89 JANUARY. – P. 38–45.
7. **Shinroku Matsuzaki.** Development of Visualizing Information Technique of Blast Furnace Operation / Shinroku Matsuzaki // NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT. – 2006. – № 94 July. – P. 96–102.

Поступила в редакцію 26.01.2011

Розроблено інформаційну систему, за допомогою якої можна візуально оцінити тепловий стан периферійної зони доменної печі, а також стан її огороження на підставі інформації, що отримана від датчиків системи випарного охолодження шахти і заплечиків. Надана система реалізована у складі АСУ ТП доменної печі № 6 ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Information system for visual estimation of thermal state of furnace peripheral zone as well as its railing state based on data received from sensors of evaporative cooling system of a stack and bosh was developed. This system is a part of automation control system of blast furnace No. 6 at OJSC "ArcelorMittal Kryviy Rih" and enables optimizing energy consumption during blast-furnace smelting process.