

На правах рукописи



ЗОЛОТЫХ Максим Олегович

**РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ
СОСТОЯНИЯ ОГНЕУПОРНОЙ ФУТЕРОВКИ
ГОРНА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена в лаборатории пирометаллургии черных металлов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук и на кафедре теплофизики и информатики в металлургии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор
Дмитриев Андрей Николаевич

Официальные оппоненты:

Курунов Иван Филиппович,
доктор технических наук, профессор, ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат», главный доменщик;

Дружков Виталий Гаврилович,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», доцент кафедры металлургии чёрных металлов

Ведущая организация –

ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической тепло-техники», г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится 25 декабря 2015 г. в 15:30 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан 10 ноября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сулицин Андрей Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Доменное производство является одним из важнейших звеньев в цепочке технологических операций по производству стали. Поэтому его совершенствование очень важно в современной экономике. Одним из факторов повышения эффективности доменной плавки является снижение себестоимости производства чугуна за счет продления кампании агрегата. Срок службы доменной печи во многом определяется техническим состоянием огнеупорной кладки металлоприемника, чрезмерный износ которой может привести к преждевременному выводу агрегата из эксплуатации.

Залогом долгой службы огнеупорной футеровки горна доменной печи является поддержание оптимальных температурных режимов работы и создание защитного гарнисажа, который является одним из наиболее эффективных средств защиты кладки от механического и химического воздействия продуктов плавки. Формирование защитного гарнисажа осуществляется введением специальных добавок в шихту или дутьё. Как правило, в таких добавках присутствуют титансодержащие компоненты, обладающие высокими тугоплавкими свойствами. Дополнительно процесс плавки может корректироваться за счет повышения интенсивности работы системы охлаждения в отдельных областях горна.

Для выполнения мониторинга состояния огнеупорной футеровки горна и принятия правильных технических решений необходима информационная система, которая позволяет оценивать состояние футеровки горна: распределение температур в кладке и ее текущий профиль. Подобная система за счёт оценки динамики изменения толщины стенок печи позволит избежать возникновения такой чрезвычайной ситуации техногенного характера на металлургическом производстве, как прорыв горна доменной печи.

Степень разработанности темы исследования. Основная трудность при контроле износа футеровки горна доменной печи состоит в том, что невозможно непосредственно измерить остаточную толщину стенок. Её можно определить только косвенными методами. На сегодняшний день существуют системы диагностики кладки, основанные на использовании: специальных зондов, радиоактивных изотопов, звуковых волн и измерения теплофизических характеристик горна. Подробное рассмотрение и сравнение этих методов осуществлено в аналитическом обзоре. В настоящем исследовании подробно проанализирован метод диагностики, основанный на математической обработке показаний температурных датчиков, размещённых в огнеупорной футеровке горна. Ранее

аналогичные задачи рассматривались в работах Ю.В. Серова, В.Г. Макиенко, Н.М. Можаренко, М. Шульте, В. Ковальски, Х. Чжао и др.

Цель диссертационной работы заключается в разработке и совершенствовании системы контроля состояния огнеупорной футеровки горна доменной печи на основе данных о температурах в различных точках кладки горна.

Для достижения поставленной цели решены **следующие задачи**:

1. Разработана математическая модель тепловых процессов в кладке горна доменной печи, которая позволяет на основе данных о температурах в фиксированных точках кладки определять температурное поле по высоте и радиусу огнеупорной футеровки и на основе полученной информации определять профиль горна печи.

2. Определены технологические требования к исходным данным, получаемым от температурных датчиков и используемым при построении температурного поля в футеровке горна и линии разгара огнеупоров.

3. Разработана методика расчёта эффективной теплопроводности – величины, позволяющей осуществлять адаптацию разработанной модели к объекту диагностики за счёт компенсации систематических погрешностей при расчётах.

4. Разработана методика оптимальной установки термопар в огнеупорной футеровке горна, адаптированная к разработанной математической модели, учитывающая возможность выхода из строя датчиков и необходимость повышенного внимания к зонам огнеупоров, наиболее подверженным эрозии.

Научная новизна и теоретическая значимость работы

На основании проведенных исследований были получены новые научные результаты:

1. Предложена математическая модель тепловых процессов в кладке горна доменной печи, позволяющая определять температурное поле в огнеупорной футеровке и текущий профиль кладки огнеупоров.

2. Разработана методика определения координат расположения и количества температурных датчиков в огнеупорной футеровке горна печи, учитывающая особенности воздействия жидких продуктов плавки на футеровку.

3. Разработана методика определения коэффициента эффективной теплопроводности огнеупорных материалов, использованных для футеровки горна, позволяющая компенсировать систематические погрешности расчётов температурного поля.

4. Исследовано влияние интервала дискретизации сигнала температурного датчика на точность его восстановления.

Практическая значимость работы. Разработанная математическая модель реализована в программном обеспечении, внедренном на действующих металлургических агрегатах для оценки состояния огнеупорной футеровки горна доменной печи. Внедрение осуществлено на 5 доменных печах в КНР с оформлением соответствующих актов. На две программы получены свидетельства на регистрацию двух программ для ЭВМ № 2014610768 и № 2014610769.

Благодаря универсальности разработанной математической модели ее программное обеспечение может быть внедрено на доменных печах, на которых уже используются другие модели построения разгара футеровки горна на основе показаний температурных датчиков в кладке в качестве основной или дублирующей системы. В частности, модель была использована для оценки состояния доменной печи № 5 Нижнетагильского металлургического комбината.

Работа «Система контроля состояния огнеупорной футеровки горна доменной печи» является победителем выставки «Металл-Экспо 2014» (Россия, Москва) и награждена серебряной медалью за разработку и внедрение в эксплуатацию оборудования и технологий, отвечающих современному техническому уровню.

Методология и методы исследования. Оценку температурных полей футеровки горна доменных печей производили методами математического моделирования на основе численного решения дифференциальных уравнений теплообмена. В качестве исходных данных для моделирования привлекали показатели температурных датчиков, установленных в огнеупорной кладке горна действующих доменных печей. Полученные результаты предоставлялись обслуживающему персоналу. При моделировании использованы основные положения теории цифровой обработки сигналов. Обработка полученных результатов производилась при помощи специально разработанного на языке C++ программного обеспечения, математического пакета MATLAB и табличного процессора Microsoft Excel.

Основные защищаемые положения:

1. Математическая модель тепловых процессов в кладке горна доменной печи, позволяющая на основе данных о температурах в фиксированных точках кладки определять температурное поле огнеупорной футеровки и, на основе полученной информации, оценивать развитие процессов разгара огнеупоров. Модель предназначена для информационного обеспечения технологических операций по созданию защитного гарнисажа.

2. Методика расположения температурных датчиков в кладке печи, обеспечивающая достоверность информации о температурном поле футеровки горна.

3. Методика определения эффективной теплопроводности огнеупоров, предназначенная для компенсации систематических погрешностей расчётов температурного поля.

4. Результаты исследования влияния интервала дискретизации на точность восстановления сигнала температурного датчика и классификация неисправностей температурных датчиков.

5. Результаты применения разработанной модели к действующим доменным печам и основные направления дальнейшего совершенствования предложенной математической модели.

Достоверность результатов проведенных исследований обеспечена применением комплекса современных методов исследования, воспроизводимостью результатов, согласованием результатов опытов с известными литературными данными и положительными результатами внедрения в промышленность.

Апробация работы. Материалы диссертации были доложены и обсуждены на: International Symposium Control, Optimization and Automation in Mining, Minerals and Metal Processing, August 25-28 2013, San Diego, California, USA; IX всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве AS'2013», 28-30 ноября 2013 г., Новокузнецк, Россия; Международной научно-практической конференции «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло» (ТИМ-2014), 26-28 марта 2014 г., Екатеринбург, Россия; Шестом Международном промышленном Форуме «Реконструкция промышленных предприятий - прорывные технологии в металлургии и машиностроении», 15-18 апреля 2014 г., Челябинск, Россия; Международном форуме «Мир Промышленности / WIN Russia Ural – 2014», Екатеринбург, Россия, 23-25 сентября 2014 г.; Четвёртой международной научно-практической конференции «Инновации в материаловедении и металлургии», 15-18 декабря 2014 г., Екатеринбург, Россия; Четвёртой научно-практической конференции «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ-2015), 26-27 марта 2015 г., Екатеринбург, Россия; Научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» (НИОКР-2015), 3-5 июня 2015, Екатеринбург, Россия; International Conference METEC & 2nd ESTAD, 15-19 June 2015, Düsseldorf, Germany.

Личный вклад автора заключается в разработке математической модели диагностики состояния огнеупорной футеровки горна доменной печи, методик оптимального расположения термопар и определения эффективной теплопроводности огнеупоров.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получено 2 свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ и баз данных.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 160 страницах машинописного текста, включая 68 рисунков, 11 таблиц, и состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 99 источников отечественных и зарубежных авторов и 2 приложений.

Автор искренне благодарен к.т.н., доценту УрФУ Иванову О.Ю. и к.т.н., зав. лабораторией ИМЕТ УрО РАН Чеснокову Ю.А. за весьма ценные замечания и советы при подготовке диссертационной работы.

Основное содержание работы

Глава 1. Аналитический обзор и постановка задач исследования

Срок службы доменной печи в большинстве случаев определяется сроком службы кладки металлоприемника. Износостойких огнеупорных футеровок горна не существует, однако постоянно происходит совершенствование технологий, направленных на продление срока их службы. Все мероприятия по продлению срока эксплуатации металлоприемника доменной печи можно разделить на две большие группы:

- мероприятия, направленные на повышение проектной прочности кладки (подбор материалов, способов кладки, режимов работы доменной печи и т.д.);
- мероприятия, направленные на оценку состояния действующей доменной печи и корректировку режимов работы печи в зависимости от результатов такой оценки.

Лучший способ защиты огнеупорной кладки от повреждения – образование защитного гарнисажа. Важным условием создания защитного гарнисажа является оценка состояния кладки печи, особенно ее горна, в режиме реального времени, которая позволяет регулировать загрузку шихтовых материалов, параметры дутья, работу системы охлаждения.

Для безопасной и эффективной эксплуатации доменной печи важно в любой момент знать остаточную толщину огнеупорной футеровки, и, прежде всего, расположение наиболее ослабленных ее областей. Единого подхода к орга-

низации систем диагностики не существует. В аналитическом обзоре рассмотрены основные методы диагностики футеровки: зондирование футеровки, использование радиоактивных изотопов, акустические исследования (активные и пассивные, инфра- и ультразвуковые), а также измерение температуры в различных точках печи. Наиболее перспективными способами диагностики состояния кладки являются способы, основанные на измерении температуры в различных точках металлургического агрегата.

На основании литературного обзора сформулированы цель и задачи исследования.

Глава 2. Разработка системы контроля состояния огнеупорной футеровки горна доменной печи

Из аналитического обзора следует, что система, обеспечивающая информационную поддержку операциям по созданию защитного гарнисажа, должна удовлетворять следующим требованиям:

1. оперативность и непрерывность получения данных о состоянии кладки;
2. максимальная точность определения остаточной толщины кладки;
3. определение толщины гарнисажа.

В качестве основы для разработки новой системы диагностики процессов износа футеровки горна выбрана математическая модель, основанная на решении дифференциального уравнения Фурье с использованием показаний температурных датчиков, размещённых в огнеупорной кладке горна. Остаточная толщина огнеупорной футеровки и величина гарнисажа определяются в ходе численного решения этого уравнения. На Рисунке 1 приведено вертикальное сечение горна доменной печи с размещёнными в его футеровке датчиками. Профиль горна был разделен на три зоны, в каждой из которых используется свой алгоритм поиска линии разгара: А – боковая стенка, Б – угловая зона и В – лещадь. При расчётах в зоне А и В использовано одномерное уравнение теплопроводности, а в зоне Б – двумерное.

При проведении расчетов учитывается зависимость коэффициента теплопроводности – λ , от температуры огнеупора – t . Тепловое состояние горна оценивалось как стационарное. При решении дифференциального уравнения теплопроводности использованы граничные условия первого рода: на краях рассматриваемого участка температура задаётся показаниями температурных датчиков с одной стороны и изотермической поверхностью 1150 °С (соответствующей температуре кристаллизации расплава, принятой в качестве границы кладки) – с другой. При этом неизвестной величиной является толщина кладки.

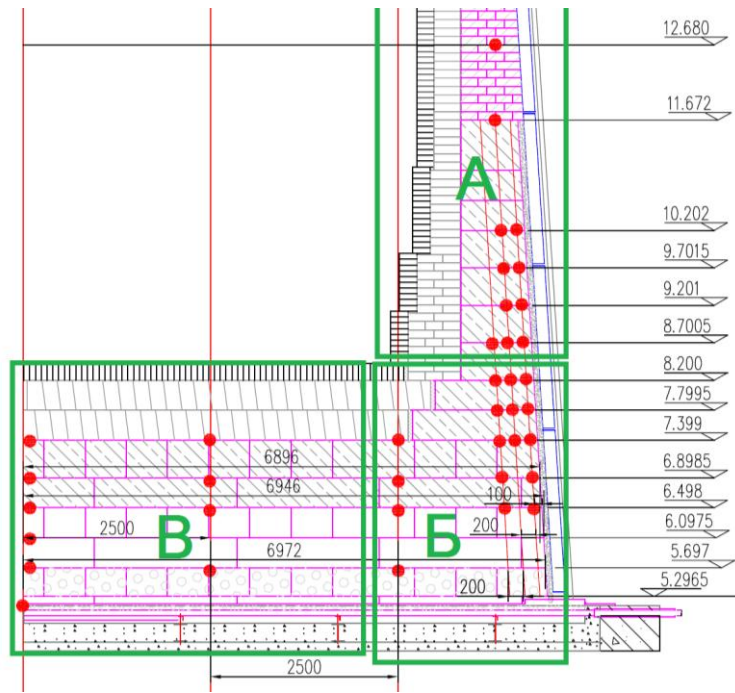


Рисунок 1 – Вертикальное сечение горна доменной печи объёмом 2500 м³ комбината Лючжоу

В результате анализа различных вариантов математического моделирования была разработана блок-схема алгоритма определения текущего температурного поля огнеупорной кладки горна доменной печи и характеристик ее износа, которая приведена на Рисунке 2.

Набор входных данных подвергается усреднению для исключения влияния случайных погрешностей измерения. Затем из набора показаний исключаются датчики с недостоверными показаниями.

Недостоверные показания датчиков могут вызваны:

- ошибкой заложения датчика в кладку при её строительстве;
- ошибкой коммутации термопарного кабеля;
- повреждением термопарного кабеля;
- повреждением термопары;
- деградацией термопары.

Каждая из неисправностей имеет свои характерные признаки, связанные с формой сигнала и временем возникновения.

В алгоритме расчёта используется интегральный температурный критерий, представляющий собой сумму показаний всех достоверных датчиков. Данный критерий необходим, так как ни один датчик в отдельности не может служить показателем теплового режима кладки горна. Решение об окончании процесса разогрева кладки принимается при прекращении роста значения интегрального температурного критерия.

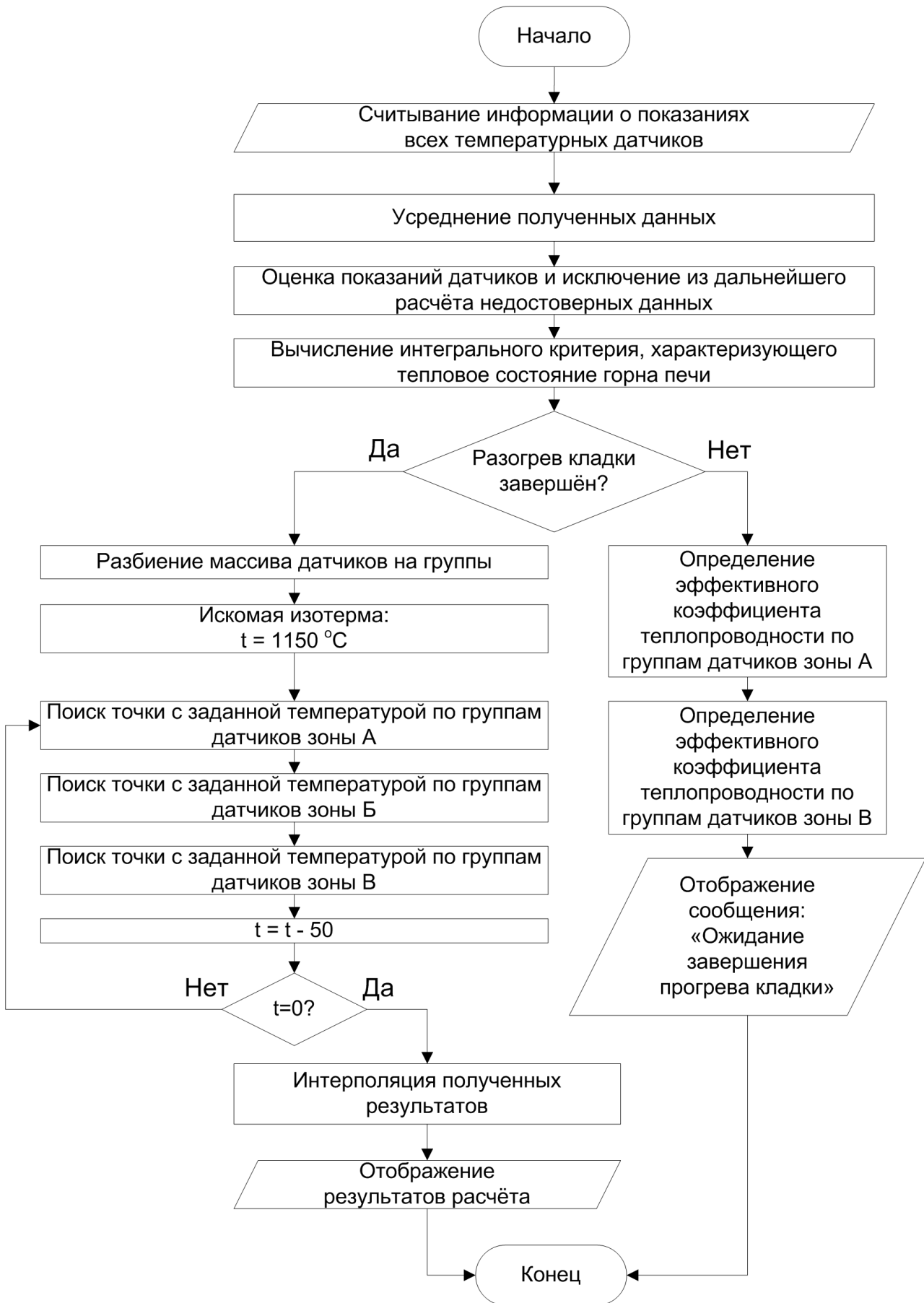


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма оценки состояния кладки

Поиск решения в зонах А, Б и В производится для изотерм от 50 °С до 1150 °С с шагом 50 °С, где изотерма 1150 °С принимается соответствующей границе разгара кладки. Остальные изотермы используются для построения температурного поля кладки.

Для заданных в боковой стенке (зона А) условий дифференциальное уравнение Фурье принимает вид

$$\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial r} r = C. \quad (1)$$

В формуле (1) C – константа, не зависящая от r и t . При этом $-\lambda(t)(\partial t / \partial r)$ определяет тепловой поток q в произвольной точке с радиусом r (в данном случае он обратно пропорционален радиусу $q=C/r$). В расчётах толщины огнеупорной футеровки использовали соотношение

$$C = \frac{\int_{t_i}^{t_j} \lambda(t) dt}{\ln r_j - \ln r_i}. \quad (2)$$

Константу C вычисляли для пары датчиков 1 и 2 (Рисунок 3) и оставляли ее справедливой для всех остальных слоёв огнеупоров в одномерной задаче. Для случая, изображённого на рисунке 3, точки i и j в формуле 2 соответствуют точкам кладки 1, 2, А, Б и В. При поиске решения для слоёв огнеупоров, не имеющих контакта с продуктами плавки, искомой величиной является температура на границе слоя, так как его толщина известна. Для слоя, входящего в контакт с продуктами плавки (или слоя гарнисажа, который в рассматриваемой задаче аналогичен слою огнеупоров), неизвестной величиной выступала его толщина при известной температуре внутренней поверхности.

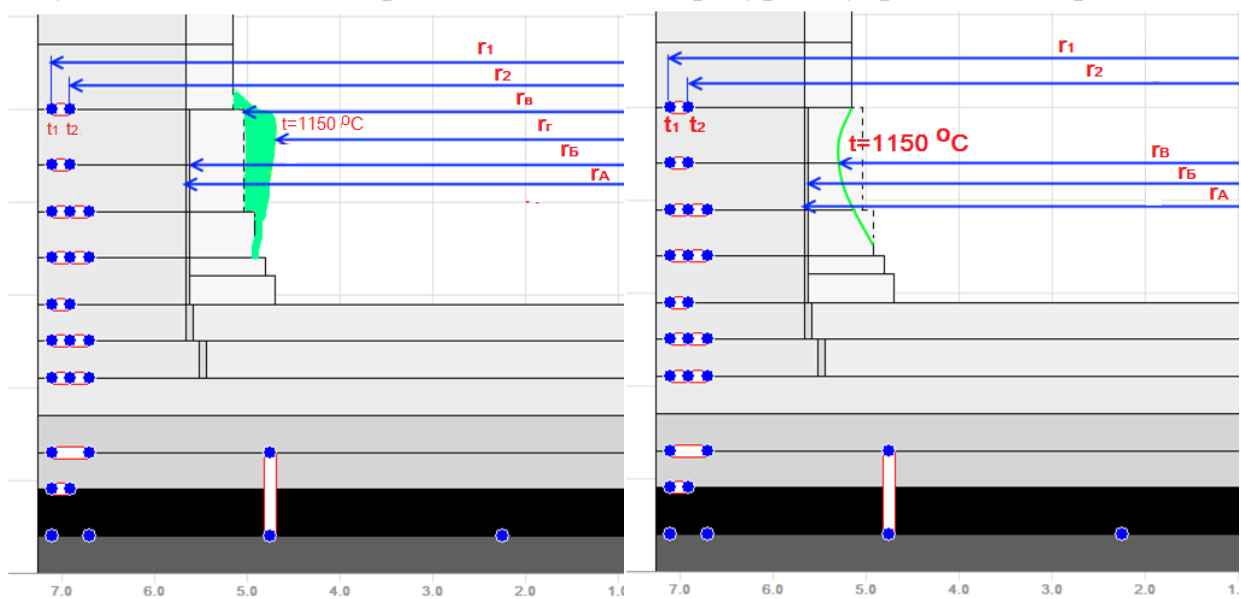


Рисунок 3 – Поиск толщины стенки в случае образования гарнисажа (слева) или разгара кладки (справа)

Необходимое условие применения модели – непрерывность наблюдений: для правильной оценки состояния кладки всегда необходимо знать максимальный разгар огнеупоров. Если на линии максимального разгара вычисленная температура менее 1150 °С, это свидетельствует об образовании слоя гарнисажа, учитываемого в модели как дополнительный слой с собственной теплопроводностью.

Аналогичным образом производится поиск остаточной толщины лещади, но вместо формулы 2 используется формула

$$C = \frac{\int_{t_i}^{t_j} \lambda(t) dt}{z_j - z_i}. \quad (3)$$

Для определения толщины кладки в месте примыкания боковых стенок горна к лещади (зона Б) применили двумерное уравнение теплопроводности, решение которого находили для каждого вертикального сечения печи, содержащего температурные датчики. Схема расположения датчиков в угловой зоне горна доменной печи приведена на Рисунке 4.

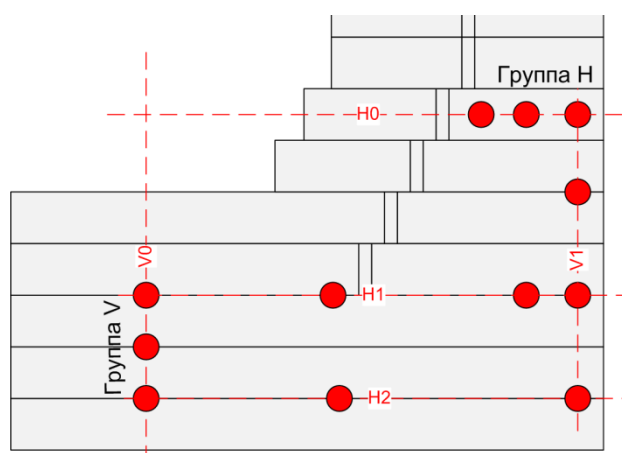


Рисунок 4 – Расположение температурных датчиков в вертикальном сечении угловой зоны печи

Граничными условиями для расчёта температурного поля в угловой зоне (зона Б) являются результаты решения одномерных уравнений теплопроводности по указанным выше формулам (на рисунке 4 – линии V0 и H0) и результаты измерения температур в местах установки датчиков.

В пределах прямоугольной области вычисления температур могут быть проведены дополнительные линии, так, например, при большом прогаре лещади вместо линии H0 может быть задействована линия H1 (при условии, что прогар лещади будет глубже этой линии).

В каждой из расчётных зон дифференциальное уравнение теплопроводности принимает вид

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} = 0. \quad (4)$$

Для поиска распределения температур используется метод конечных разностей. Шаг составляет 0,1 м.

Результаты расчётов для зон А, Б и В объединяются в трёхмерную поверхность при помощи механизмов интерполяции.

Интерполяция профиля горна печи происходит для функции $r=F(\alpha, \varphi)$, которая описывает внутреннюю поверхность горна в сферической системе координат (r – радиус, α – зенитный угол и φ – азимутальный угол), точка отсчёта которой лежит на вершине горна, на оси печи. Для фурменных сечений используется функция $r=F(\alpha, \varphi)$, где φ – константа. При интерполяции необходимо учитывать следующие два фактора: при небольших разгарах (нагарах) функция $F'(\alpha)$ должна сохранять исходную геометрию доменной печи, а при больших значениях разгара исходная форма сечения уже не должна оказывать влияния на форму функции. Эти два фактора формируют противоречивые требования к алгоритму интерполяции. Для получения компромиссного решения применили адаптивную формулу интерполяции

$$\begin{cases} F'(\alpha) = F'_1(\alpha) \frac{|P-D(\alpha)|}{P} + F'_2(\alpha) \left(1 - \frac{|P-D(\alpha)|}{P}\right), & \text{при } D(\alpha) < P \\ F'(\alpha) = F'_2(\alpha), & \text{при } D(\alpha) \geq P \end{cases}. \quad (5)$$

Здесь $D(\alpha)$ – вспомогательная функция, характеризующая отклонение расчетного значения от исходного профиля; P – параметр, определяющий смену типов аппроксимации; $F'_1(\alpha)=F(\alpha)-D(\alpha)$, а $F'_2(\alpha)$ имеет вид

$$F'_2(\alpha) = r_A + (r_B - r_A) \frac{(\alpha - \alpha_A)}{(\alpha_B - \alpha_A)}. \quad (6)$$

Вспомогательная функция D на отрезке $\alpha_A - \alpha_B$ вычисляется по формуле

$$D(\alpha) = (r_{A_0} - r_A) + \frac{(r_{B_0} - r_B) - (r_{A_0} - r_A)}{(\alpha_B - \alpha_A)} (\alpha - \alpha_A). \quad (7)$$

Интерполяция для других отрезков функции $F'(\alpha)$ выполняется аналогично. Результат интерполяции при $P=500$ приведён на Рисунке 5.

Полученный набор функций $F'(\alpha)$ для различных фурменных сечений объединяется в поверхность $F(\alpha, \varphi)$ при помощи линейной интерполяции.

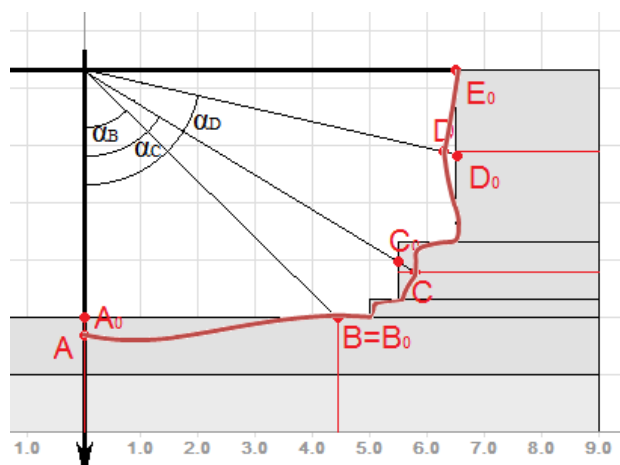


Рисунок 5– Результат интерполяции профиля футеровки горна доменной печи

В правильности диагностики состояния футеровки решающую роль играет расположение температурных датчиков. Увеличение количества датчиков приводит к увеличению расходов на организацию системы контроля (датчики, линии связи, контроллеры сбора данных, работы по монтажу и т.д.) и негативно сказывается на прочности самой кладки и кожуха доменной печи. При этом уменьшение количества датчиков снижает вероятность раннего обнаружения дефекта футеровки. Обобщение опыта анализа размещения температурных датчиков на различных доменных печах позволило сформулировать правила размещения термопар, описанные в работе.

1. Датчики располагаются группами на осях, сформированных на пересечении вертикальных фурменных сечений и горизонтальных слоёв кладки и формируют расчётные группы из не менее чем двух датчиков.

2. Расстояние между датчиками в группе необходимо выбирать таким образом, чтобы в условиях нормальной эксплуатации печи разница температур между ближайшими датчиками была не менее $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это позволяет снизить влияние погрешности измерения разности температур.

3. Решение уравнения теплопроводности в каждой расчётной группе, в рамках предложенной модели, даёт одну точку на внутренней поверхности горна. Такие точки должны равномерно располагаться по развёртке горна печи, кроме окрестностей лётков и угловой зоны печи, в которых плотность точек должна быть увеличена. В любом случае расстояние на внутренней поверхности горна между такими точками не должно превышать 2 м.

4. Для рассматриваемой модели особую роль играет группа датчиков, расположенная в центре лещади. В такую группу должно входить не менее 6 датчиков.

При сохранении сигнала термопар в цифровой форме важной задачей является определение частоты взятия отсчётов во времени. Частота дискретизации должна обеспечить оптимальное соотношение точности восстановления сигнала и объёма обрабатываемой информации. В работе приведено обоснование оптимального интервала дискретизации, равного 15 минутам. Помимо традиционной равномерной дискретизации в работе предложен алгоритм неравномерной дискретизации: отсчёты сигнала берутся в зависимости от его скорости и характера изменения. Алгоритм дискретизации учитывает используемую при восстановлении сигнала интерполяционную функцию и, в зависимости от соответствия ей реального сигнала, подстраивает шаг дискретизации.

Одним из самых важных параметров в рассматриваемой математической модели разгара футеровки является теплопроводность огнеупоров, так как она определяет градиент температур в огнеупорной кладке горна и, в конечном счёте, положение внутренней границы кладки. В кладке горна обычно используется до десятка различных видов огнеупорных материалов: графит, углерод, карборунд и т.д. Характеристики материалов, заявленные производителем, могут отличаться от фактических по следующим причинам: разброс параметров огнеупоров в различных партиях; пребывание огнеупоров кладки под давлением, обусловленным весом продуктов плавки и конструкций доменной печи; наличие между блоками огнеупоров зазоров, заполненных газами; при длительной эксплуатации печи возможно перерождение огнеупорных материалов и инфильтрация продуктами плавки.

Перечисленные причины приводят к появлению систематической погрешности в вычислениях. Для компенсации этих причин использован эффективный коэффициент теплопроводности, что позволило адаптировать математическую модель к конкретным условиям использования огнеупорных материалов.

Необходимо отметить, что уравнения, применяемые для расчета распределения температур, остаются справедливыми, если коэффициенты теплопроводности всех материалов, использованных в футеровке горна, умножить на одну и ту же постоянную величину. Таким образом, для вычислений могут использоваться не только абсолютные значения коэффициента теплопроводности материалов, но и его относительные значения: когда теплопроводность одного слоя выражается через отношение к теплопроводности соседнего слоя. Таким образом, эффективная теплопроводность может быть относительной величиной.

В течение кампании доменной печи коэффициент эффективной теплопроводности может изменяться. Это обусловлено постепенным перерождением

огнеупоров, сопровождающимся изменением их физических свойств. Обязательным условием определения эффективного коэффициента теплопроводности является наличие дополнительной информации о форме кладки. Эта информация может быть получена из рабочей документации печи (при задувке, до начала износа) или из периодического акустического обследования.

Для проведения расчётов эффективного коэффициента теплопроводности необходимо наличие в печи трёх датчиков, расположенных на одной линии, параллельной тепловому потоку (в зоне А или В) так, как это показано на рисунке 6.

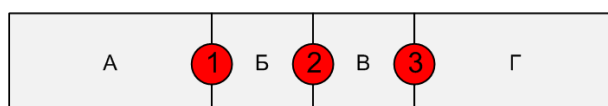


Рисунок 6 – Расположение датчиков между слоями кладки

На рисунке 6 *A*, *Б*, *В* и *Г* – слои огнеупоров. При этом материалы *Б* и *В* могут совпадать, а материалы *A* и *Г* не влияют на расчёт. При отсутствии третьего датчика вместо него может быть использована точка с температурой 1150 °С на внутренней стенке горна. Однако для этого требуется принять два предположения: в горне присутствуют жидкие продукты плавки и известна толщина стенки. Для приведённой на рисунке ситуации из формулы 2 следует

$$\frac{\int_{t_2}^{t_3} \lambda_B(t) dt}{\ln r_3 - \ln r_2} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \lambda_B(t) dt}{\ln r_2 - \ln r_1} \quad (8)$$

Разница температур соседних датчиков (1-2 и 2-3) обычно невелика, поэтому изменение теплопроводности на участке от t_1-t_2 и t_2-t_3 составит:

$$\frac{(t_2-t_3)\lambda_B\left(\frac{t_2+t_3}{2}\right)}{\ln r_3 - \ln r_2} = \frac{(t_1-t_2)\lambda_B\left(\frac{t_1+t_2}{2}\right)}{\ln r_2 - \ln r_1},$$

$$\lambda_B(t_{23cp}) = \frac{(t_1-t_2)(\ln r_3 - \ln r_2)}{(\ln r_2 - \ln r_1)(t_2-t_3)} \lambda_B(t_{12cp}). \quad (9)$$

где t_{ijcp} – среднеарифметическое между t_i и t_j .

При анализе процесса разогрева футеровки после задувки печи выражение 9 может быть получено для различных групп датчиков, слоёв огнеупоров, комбинаций температуры t_{23cp} и t_{12cp}

$$\lambda_B(t_{23cp_i}) = c_i \lambda_B(t_{12cp_i}). \quad (10)$$

В соотношении (10) i – номер температурного замера для материалов *В* и *Б*. Полученные при анализе температур в кладке соотношения объединяются в систему уравнений, на основании которой производится интерполяция функции $\lambda_m(t)$. Для единственной произвольной температуры t_0 из множества t_{cp_i} коэффициент теплопроводности материала m может быть обозначен как λ_0 . То-

гда зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температуры можно записать в виде

$$\lambda_m(t) = \lambda_0 c_m(t), \quad (11)$$

где $c_m(t)$ описывает зависимость теплопроводности от температуры с точностью до постоянного множителя.

Рассмотренные методы сбора показаний датчиков и определения эффективного коэффициента теплопроводности играют исключительную роль в подготовке данных для проведения расчётов и являются неотъемлемой частью предложенной математической модели.

Глава 3. Проверка теоретических предположений на массивах экспериментальных данных

Математическая модель и разработанное программное обеспечение прошли практическую проверку на действующих доменных печах.

На доменной печи №3 комбината JiNan Iron & Steel Group Co.Ltd, объемом 1750 м³ было проведено исследование влияния интервала дискретизации при сборе показаний температурных датчиков на точность передачи информации о развитии процессов теплообмена в кладке. Для анализа были использованы показания температурных датчиков в футеровке горна доменной печи за июль 2014 года. С целью изучения влияния интервала дискретизации на точность восстановления функции была сформирована квазинепрерывная эталонная последовательность, которая содержала отсчёты, взятые с интервалом 15 с. Интервал в 15 с выбран как явно избыточный для передачи формы сигнала температурных датчиков. В Таблице 1 приведены результаты сравнения интерполяции последовательностей из более редких отсчётов с эталонной.

Дополнительно к выборкам равномерной дискретизации был проведён сбор данных с помощью адаптивного алгоритма. При этом среднее значение интервала дискретизации составило 1580 с (26 мин.). Среднеквадратическая погрешность составила 0,0093, что несколько лучше, чем погрешность для линейной интерполяции последовательности с равномерным шагом дискретизации 5 мин.

Таблица 1 – Сравнение функций с различными интервалами дискретизации

Интервал	15 с	1 мин.	5 мин.	10 мин.	15 мин.	30 мин.	1 час	6 часов	12 часов
Среднеквадратическая погрешность, °С	-	0,003	0,01	0,03	0,04	0,09	0,17	0,70	1,06

Таким образом, использование адаптивного алгоритма позволило почти в пять раз сократить объём хранимой информации о сигнале при одинаковой точности восстановления.

При анализе показаний термопар производили фильтрацию неисправных термодатчиков. На основе изучения условий задувки 4-х доменных печей различного объема установлено, что в этот период работы печей при задувке печи из строя выходит до 10% датчиков. Среди оставшихся достоверных датчиков был проведён анализ скорости изменения температуры, результаты которого приведены в Таблице 2.

Таблица 2 – Распределение скоростей изменения температуры

Диапазон скоростей	0-1 °С/час	1-2 °С/ час	2-3 °С/ час	3-4 °С/ час	5-6 °С/ час
К-во записей	70,2%	21,9%	5,2%	1,2%	0,56%

Диапазон скоростей	6-7 °С/ час	7-8 °С/ час	8-9 °С/ час	9-10 °С/ час	>10 °С/ час
К-во записей	0,51%	0,21%	0,1%	0,07%	0,05%

Как следует из данных, приведённых в Таблице 2, основное количество (99,95%) замеров показаний от достоверных датчиков соответствует скоростям изменения температуры до 10 °С/час. Эта величина может быть принята в качестве критерия автоматической фильтрации недостоверных показаний.

Помимо анализа показаний датчиков был произведён расчёт эффективного коэффициента теплопроводности. Расчёты проводились для условий доменной печи комбината LiuZhou Iron & Steel Group Co.Ltd объёмом 2500 м³. Результаты определения относительной теплопроводности приведены в Таблице 3, где λ_0 – теплопроводность супермикропористого углеродистого кирпича при температуре 20 °С (в процентах указано отклонение от паспортных значений).

Таблица 3 – Расчетный эффективный коэффициент теплопроводности огнеупоров

п/п	Материал	Эффективный коэффициент теплопроводности		
		20 °С	300 °С	600 °С
1	Супермикропористый углеродистый кирпич	λ_0 (0%)	$1,21\lambda_0$ (9%)	$1,27\lambda_0$ (23%)
2	Микропористый углеродистый кирпич	$0,6\lambda_0$ (-3%)	$1,07\lambda_0$ (-27%)	нет данных
3	Графитовый блок	$3,5\lambda_0$ (20%)	$6\lambda_0$ (-20%)	нет данных
4	Корундомуллитовые блоки	нет данных	нет данных	$1,17\lambda_0$ (12%)

Адаптация математической модели теплового состояния огнеупорной футеровки горна доменной печи за счёт использования эффективной теплопроводности позволила повысить точность определения линии разгара. Оценка адекватности моделирования была произведена путём решения обратной задачи: для используемой математической модели было рассчитано распределение температур в кладке известной формы, после чего было проведено сравнение с фактически полученными после задувки печи температурами. Установлено, что без определения эффективного коэффициента теплопроводности погрешность расчётов достигает 25-30%, а после адаптации – не превышает 15% (при этом отклонение эффективной теплопроводности от абсолютной достигло 27%).

Глава 4. Внедрение разработанной модели в производственный процесс

Внедрение системы, контролирующей тепловое состояние футеровки горна и степень ее износа с использованием разработанного программного обеспечения, на действующих доменных печах было начато в 2010 году. К настоящему времени система контроля реализована на 5-ти доменных печах в КНР, перечисленных в Таблице 4. В качестве примера может служить характеристика системы контроля, которая была внедрена в 2012 году на доменной печи комбината LiuZhou Iron & Steel объёмом 2500 м³. В футеровке горна доменной печи для измерения температуры ее слоев было установлено 383 датчика. Показания этих температурных датчиков позволили получить температурное поле футеровки горна через два месяца после задувки печи, представленное на Рисунке 7. Судя по границам поля, по отношению к проектным размерам горна после задувки печи и выхода ее на устойчивую работу произошла незначительная эрозия огнеупоров в центральной части лещади, не превышающая по абсолютной величине 300 мм. Распределение температур по окружности печи следует охарактеризовать как равномерное, что является свидетельством нормальной работы печи.

Таблица 4 – Внедрение программного обеспечения на доменных печах

№ п/п	Предприятие	Печь	Год внедрения
1	JiNan Iron & Steel Group Co.Ltd	№4, 3200 м ³	2010
2	JiYuan Iron & Steel Group Co.Ltd	№2, 1080 м ³	2011
3	LiuZhou Iron & Steel Group Co.Ltd	№4, 2500 м ³	2012
4	JiNan Iron & Steel Group Co.Ltd	№3, 1750 м ³	2013
5	JiNan Iron & Steel Group Co.Ltd	№1, 1750 м ³	2014

Внедрение системы технологического контроля состояния футеровки горна на некоторых доменных печах осуществлялось с использованием существующих схем расстановки датчиков, не адаптированных к рассматриваемой модели. В проекте новой доменной печи завода Жичжао (КНР) объёмом 5100 м³ предусмотрена система технологического контроля, описанная в главе 2, в которой учтены рекомендации настоящего исследования по расстановке 1065 датчиков, устанавливаемых в 17 горизонтальных и 40 вертикальных (фурменных) сечениях.

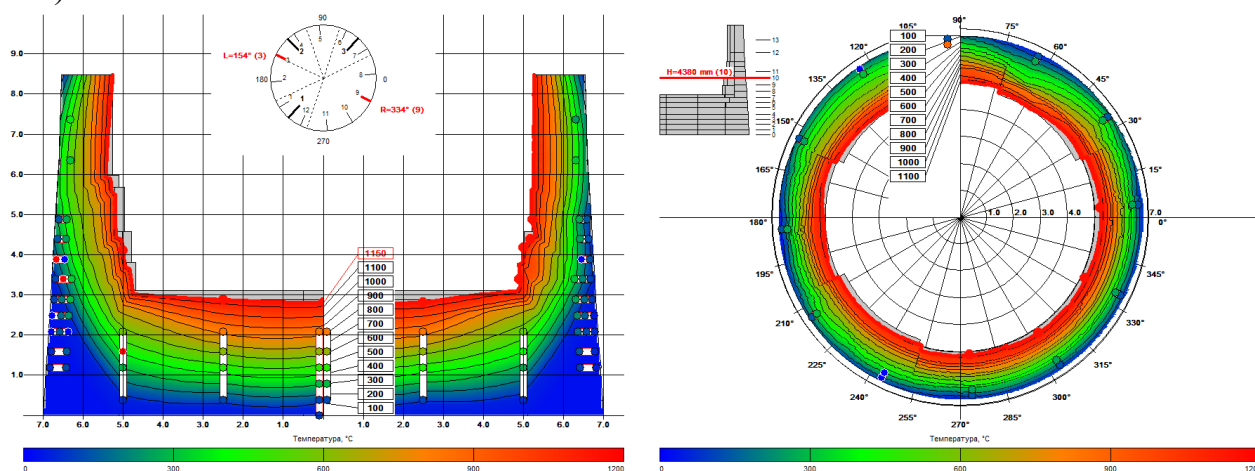


Рисунок 7 – Распределение температур в горне доменной печи Лючжоу

Недостаточное количество термопар существенно снижает качество технологического контроля. Об этом свидетельствуют материалы исследований, выполненных на доменной печи №5 Нижнетагильского металлургического комбината (ОАО «ЕВРАЗ НТМК») объёмом 2200 м³. Ее задувка была произведена в 2006 году. Удельная плотность размещения датчиков (отношение количества датчиков к рабочему объёму печи) для печи №5 более чем в 2 раза ниже аналогичных показателей для печей в КНР (Таблица 5). Кроме того, расстояние между соседними расчётными точками на внутренней поверхности печи превышает 2 м, что противоречит обязательным требованиям к размещению датчиков, сформулированным во второй главе. Результаты расчёта температурного поля в горне доменной печи НТМК через 8 лет ее работы приведены на Рисунке 8.

Результаты математического моделирования привели к следующим выводам: износ печи равномерно распределен по окружности; печь была построена с керамическим стаканом в горне, который на момент анализа состояния кладки растворён; при этом основная кладка боковых стенок практически не изношена; опасное уменьшение толщины стенок в печи отсутствует.

Таблица 5 – Количество термопар и объёмы печей

№ п/п	Печь	Объём, м ³	Количество датчиков	Датчиков/м ³
1	Цзинань №4	3200	682	0,21
2	Цзинань №3	1750	524	0,30
3	Цзинань №1	1750	524	0,30
4	Цзиюань №2	1080	212	0,20
5	Лючжоу №4	2500	383	0,15
6	Жичжао (проект)	5100	1065	0,21
7	НТМК №5	2200	197	0,09

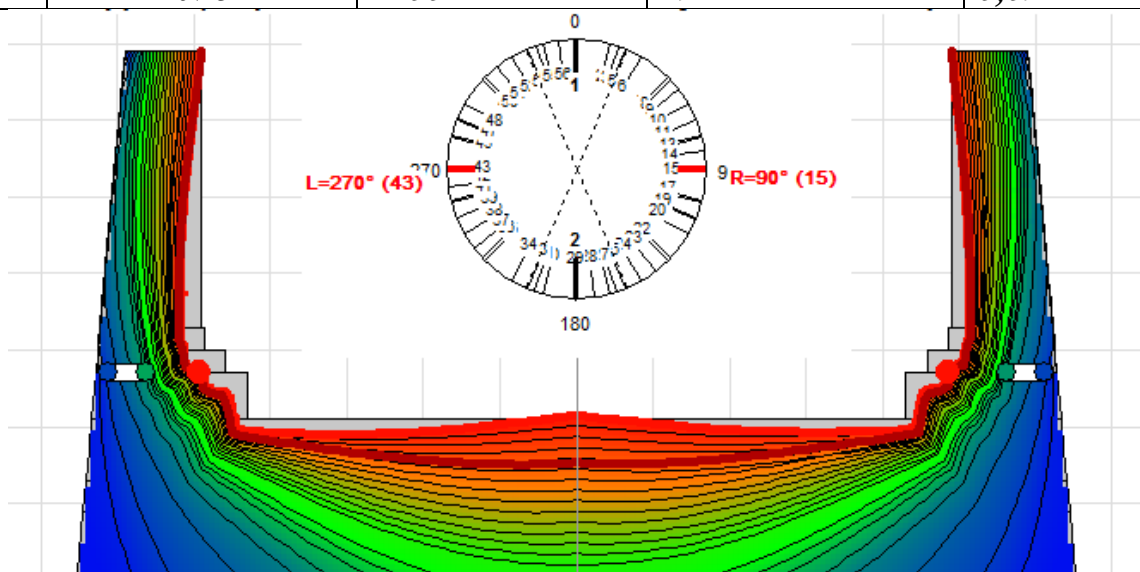


Рисунок 8 – Вертикальное сечение печи №5 НТМК 18 ноября 2014 г.

Заключение

1. Разработана технологическая система контроля за состоянием огнеупорной футеровки горна доменной печи. Ее основу составляет математическая модель тепловых процессов, позволяющая на основе данных о температурах в фиксированных точках определять температурные поля по высоте и радиусу огнеупорной футеровки и, на основе полученной информации, давать оценку текущему состоянию профиля кладки огнеупоров. Технологическая система контроля внедрена на доменных печах различного объема.

2. Разработан алгоритм адаптивной интерполяции, учитывающий сложный профиль нижней части доменной печи. Он использован при реализации математической модели процессов теплообмена в огнеупорной футеровке горна доменной печи.

3. Разработана методика определения координат расположения и количества температурных датчиков в огнеупорной футеровке горна печи с учетом особенностей предложенной системы контроля областей горна, наиболее под-

верженных воздействию жидких продуктов плавки. Методика использована при реализации проектов горна реконструируемых и вновь строящихся доменных печей, в том числе и в проекте доменной печи объемом 5100 м³.

4. Сформулированы требования к исходной информации для математической модели: определение достоверных показаний, снимаемых с термопар, частоты их получения. Предложена классификация неисправных датчиков, позволяющая выделять недостоверную информацию как в автоматическом режиме, так и путём анализа температурных трендов оператором доменной печи.

5. Разработана методика определения эффективного коэффициента теплопроводности огнеупорных материалов, использованных для футеровки горна. Методика позволяет компенсировать систематические погрешности расчетов температурного поля и повысить их точность.

6. Выполнен анализ состояния огнеупорной кладки горна действующей доменной печи объемом 2200 м³. Дана оценка степени износа огнеупорной футеровки за 8 лет эксплуатации.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК

1. Золотых, М.О. Система контроля разгара огнеупорной футеровки горна доменной печи / Дмитриев А.Н., Чесноков Ю.А., Чэнь К., Иванов О.Ю. // Сталь №11. 2013. С. 8-14. (0,20 п.л. / 0,12 п.л.).

Zolotykh, M.O. Monitoring the Wear of the Refractory Lining in the Blast-Furnace Hearth / Dmitriev A.N., Chesnokov Y.A., Chen K., Ivanov O.Y. // Steel in Translation vol. 43. №11. 2013. С. 8-14. (0,50 п.л. / 0,35 п.л.).

2. Zolotykh, M.O. Monitoring System of Firebrick Lining Erosion of Blast Furnace Hearth / Dmitriev A.N., Chesnokov Y.A., Chen K., Ivanov O.Y. // Proceedings of IFAC MMM2013 International Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Minerals and Metal Processing, August 25-28, 2013, San Diego, California, USA. IFAC Proceedings Volumes (IFAC Papers-Online), 2013. С. 294-301. (0,50 п.л. / 0,30 п.л.); входит в индекс SCOPUS

3. Zolotykh, M.O. New Monitoring System of Firebrick Lining Deterioration of Blast Furnace Devil in Metallurgical Plants of China / Dmitriev A.N., Chesnokov Y.A., Chen K., Ivanov O.Y. // Advanced Materials Research (Volumes 834 - 836). 2014. С. 939-943. (0,30 п.л. / 0,18 п.л.).

4. Zolotykh, M.O. New Monitoring System of the Refractory Lining Wear in the Blast Furnace Hearth / Dmitriev A.N., Chesnokov Y.A., Chen K., Ivanov O.Y., Vitkina G.Yu. // Applied Mechanics and Materials (Volumes 670 - 671). 2014. С. 1274-1284. (0,65 п.л. / 0,5 п.л.).

5. Zolotykh, M.O. The estimation of thermal properties of refractory materials according to the temperature acceleration curve at the blast furnace blowing-in / Dmitriev A.N., Chesnokov Y.A.,

Chen K., Ivanov O.Y., Vitkina G.Yu. // *Advanced Materials Research* Vol. 1095 (2015). С. 476-482. (0,15 п.л. / 0,09 п.л.)

6. Zolotykh, M.O. The Determination of Thermocouples Optimum Number in the Blast Furnace Hearth for Control of Its Condition / Dmitriev A.N., Chesnokov Y.A., Chen K., Ivanov O.Y., Vitkina G.Yu. // *Applied Mechanics and Materials* Vol. 741 (2015). С. 302-308. (0,15 п.л. / 0,11 п.л.)

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и баз данных:

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610768. Иванов О.Ю., Золотых М.О., Дмитриев А.Н., Чесноков Ю.А. Редактор расположения датчиков температуры для автоматизированной информационной системы мониторинга состояния футеровки доменной печи. Заявка № 2013660569 от 18.11.2013. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 16.01.2014 (РФ).

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610769. Иванов О.Ю., Золотых М.О., Дмитриев А.Н., Чесноков Ю.А. Редактор геометрии горна для автоматизированной информационной системы мониторинга состояния футеровки доменной печи. Заявка № 2013660570 от 18.11.2013.35. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 16.01.2014 (РФ).

Публикации в других изданиях:

9. Золотых, М.О. Система контроля состояния огнеупорной футеровки горна доменной печи / Дмитриев А.Н., Иванов О.Ю., Чесноков Ю.А. // *Системы автоматизации в образовании, науке производстве: Труды IX Всероссийской научно-практической конференции*. Под редакцией С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2013. С. 165-170. (0,35 п.л. / 0,15 п.л.)

10. Золотых, М.О. Оценка достоверности сигнала температурных датчиков, расположенных в футеровке горна доменной печи / Дмитриев А.Н., Иванов О.Ю., Чесноков Ю.А. // *Сборник докладов III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2014) с международным участием, посвящённой 150-летию со дня рождения Владимира Ефимовича Грум-Гржимайло (Екатеринбург, 27–29 марта 2014 г.)*. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 174-177. (0,25 п.л. / 0,20 п.л.)

11. Золотых, М.О. Разработка математической модели разгара футеровки горна доменной печи и внедрение программного обеспечения на основе этой модели / Дмитриев А.Н., Иванов О.Ю., Чесноков Ю.А. // *Инновации в материаловедении и металлургии: материалы IV Междунар. интеракт. науч.-практ. конф.* Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. С.110-113. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.)

12. Золотых, М.О. Адаптация математической модели разгара футеровки горна доменной печи к объекту диагностики / Дмитриев А.Н., Иванов О.Ю., Чесноков Ю.А. // *Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. Сборник докладов IV Всерос-*

сийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2015) с международным участием, посвящённой 95-летию основания кафедры и университета. Екатеринбург, 26–27 марта 2015 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 207-211. (0,30 п.л. / 0,25 п.л.)

13. Золотых, М.О. Анализ показаний температурных датчиков, расположенных в кладке горна печи №5 НТМК // Дмитриев А.Н., Иванов О.Ю., Чесноков Ю.А. / Труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР». Екатеринбург: УрО РАН, 2015. С. 440-444. (0,30 п.л. / 0,25 п.л.)

14. Золотых М.О. Разработка и совершенствование математических моделей пирометаллургических процессов на основе физико-химических представлений и решение практических задач черной металлургии / Дмитриев А.Н., Чесноков Ю.А., Витькина Г.Ю. // Физическая химия и технология в металлургии. Сборник трудов Института металлургии УрО РАН. Екатеринбург: УрО РАН, 2015. С. 301–308. (0,5 п.л. / 0,20 п.л.)

15. Zolotykh, M.O. The Monitoring System of the Fireproof Lining Wear in the Blast Furnace Hearth / Dmitriev A.N., Chesnokov Yu.A., Ivanov O.Yu., Chen K., Vitkina G.Yu. // Proceedings of METEC & 2nd ESTAD, 15 to 19 June 2015, Düsseldorf, Germany. Düsseldorf, 2015. С. 1-9. (0,52 п.л. / 0,30 п.л.)