



А. В. Бородулин /д. т. н./

А. И. Швачка /к. т. н./, Е. В. Чернецкий /к. т. н./,
О. Ю. Олейник /к. т. н./, Я. А. Довгопольй

ИЧМ НАНУ, г. Днепро, Украина

ВУЗ УГХТУ, г. Днепро, Украина

e-mail: AleksandrShvachka@gmail.com

Обоснование и разработка АИС контроля внешних тепловых потерь доменной печи

A. V. Borodulin /Dr. Sci. (Tech.)/

A. I. Shvachka /Cand. Sci. (Tech.)/,
E. V. Cherneckiy /Cand. Sci. (Tech.)/,
O. Y. Oleynik /Cand. Sci. (Tech.)/,
Y. A. Dovgopoliy

ISI NASU, Dnipro, Ukraine

HEI USUCT, Dnipro, Ukraine

e-mail: AleksandrShvachka@gmail.com

Rationale and development of AIS control of external heat loss blast furnace

Цель. Выполнить расчетно-аналитические исследования внешних тепловых потерь в системе водяного охлаждения, характера их изменения в течение кампании печи, воздействия на показатели плавки, использования информации по внешним тепловым потерям тепла для контроля теплового состояния печи. Создание средств контроля доменного процесса и управления им на основе углубленного анализа конструкций доменных печей и систем для повышения эффективности энергосбережения в металлургии.

Методика. Инструментальные измерения на действующих печах, выбор представительных данных, определение переменных, эвристические приемы.

Результаты. Выполнены исследования тепловых потерь периферийной зоны доменных печей. Установлена нестационарность тепловых нагрузок на холодильниках шахты, а также определена необходимость перехода к макроконтролю потерь. Предложена автоматизированная информационная система (АИС) контроля внешних тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие и описана методика оценки теплового состояния печи. Показано, что за счет уменьшения тепловых потерь в системе охлаждения имеются резервы уменьшения расхода кокса.

Научная новизна. Предложен новый метод оценки теплового состояния доменной печи (разогрев, охлаждение, нормальный ход). По результатам аналитических и инструментальных исследований тепловой работы доменной печи используются обобщенные показатели тепловой работы – удельные тепловые потери и удельный расход кокса на их компенсацию, по текущему значению которых контролируется тепловое состояние печи. Установленные закономерности определяют изменения в тепловом режиме печи, когда они еще не выявлены по другим признакам, повышают точность прогноза показателей плавки, позволяют совершенствовать приемы контроля теплового состояния группы доменных печей цеха и предупреждать изменения в их работе.

Практическая значимость. Обоснована целесообразность контроля тепловых потерь в системе охлаждения и расхода кокса на их покрытие группы доменных печей цеха для оценки эффективности снижения расхода кокса и условного топлива на выплавку чугуна, безопасности функционирования и ресурса работы ограждения. Предложен способ контроля теплового состояния печи с учетом внешних тепловых потерь и расхода кокса на их компенсацию, переданный на опытно-промышленные испытания. (Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 5 назв.)

Ключевые слова: доменная печь, тепловые потери, нестационарность, ограждение, гарнисаж, автоматизация, информационная система.

Введение. Доменная печь (ДП) как тепловой агрегат использует только некоторую часть подведенной теплоты топлива. Путем уменьшения наружных тепловых потерь и уноса теплоты с колошниковым газом можно повысить тепловую эффективность работы доменной печи [1].

Ограждение доменных печей интенсивно охлаждается для обеспечения работоспособности ее основных элементов, надежности и без-

опасности работы агрегата. При этом теряется достаточно большое количество энергии.

Состояние вопроса. Инструментальные исследования внешних потерь теплоты доменных печей берут начало с исследований Сименса [2]. Л. Белл выполнил одно из первых экспериментальных исследований температур ограждения печи и наружного воздуха, что дало ему возможность определить наружные тепловые потери

ДП № 1 и 2 «Clarence Iron Works». Практические замеры внешних потерь произведены Г. И. Деминым [1] и датируются 40-ми годами XX ст.

Теоретической основой экспериментальных замеров потерь теплоты ДП стали исследования проф. С. М. Андропова и проф. И. Д. Семикина. Они пришли к выводам, что тепловые потери в периферийной зоне являются важным фактором экономичности технологии доменной плавки. Практически автоматизированный контроль тепловых потерь был реализован в 60-х годах прошлого века В. Я. Кожухом [3].

Основная часть. Тепловые потери доменных печей с охлаждающей водой и во внешнее пространство являются комплексным показателем, характеризующим работу системы охлаждения,

состояния кладки и рабочего профиля [4]. Величина внешних тепловых потерь доменных печей по результатам инструментальных исследований составляет 10–50 МВт (рис. 1).

Тепловые потери печей одинакового объема зависят от длительности кампании, профиля и тепловой мощности печи, состояния футеровки, газораспределения, теплового режима плавки. Расход кокса на потери изменяется от 20–30 кг/т чугуна в начале кампании до 40–50 кг/т чугуна перед выдувкой. Уменьшение потерь определяет резервы экономии кокса ~10–20 кг/т чугуна (рис. 2).

Форсирование доменной плавки приводит к увеличению объема производства и внешних тепловых потерь, снижению их удельной вели-

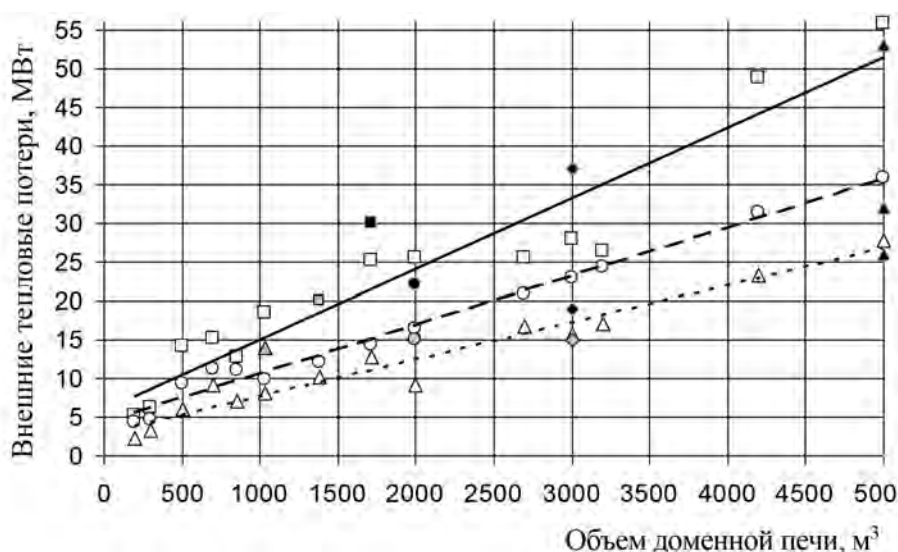


Рис. 1. Зависимость тепловых потерь от объема печи в интервале 250–5000 м³

(...) – минимальные, (– –) – средние, (–) – максимальные оценки

Инструментальные измерения на ДП: Δ – № 1 ОАО «ОХМК», Fe-Mn, 1999; \square – № 3 ПАО «АМК», 2010; \blacksquare – № 5 ПАО «АМК», 2010; \circ – № 2 ОАО «ЗСМК», 2008; \bullet – № 5 ПАО «АМКР», 2007; \diamond – № 1 ОАО «ЗСМК», 2008; \blacklozenge – № 1 ПАО «АМК», 2010; \blacktriangle – № 9 ПАО «АМКР», 2011

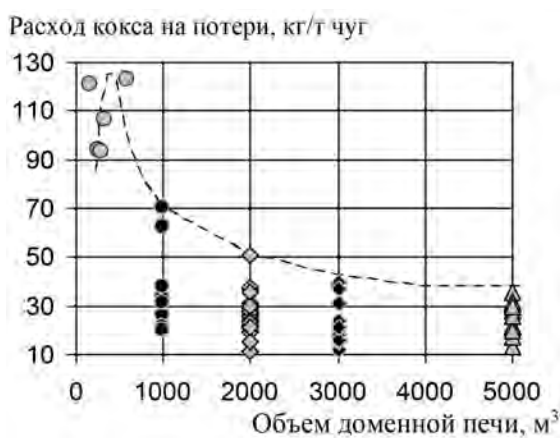


Рис. 2. Зависимость расхода кокса на потери от объема ДП:

\circ – (170–580) м³, \bullet – 1000 м³, \diamond – 2000 м³, \blacklozenge – 3000 м³, \blacktriangle – 5000 м³, (---) – тенденция макс значений

чины на тонну чугуна и расхода кокса на покрытие потерь.

Изменения в указанную тенденцию могут вносить радиальное перераспределение газового потока, состав шихты и расстройств, связанные со сходом гарнисажа. Оценить динамику изменений расхода кокса на покрытие внешних тепловых потерь позволяет обобщенная зависимость этой величины от удельных тепловых потерь (рис. 3), построенная для печей разного объема, работающих в широком диапазоне дутьевых и шихтовых условий, а также состояния футеровки печи.

Полученные calorиметрическим методом (с 1968 г.) на доменных печах России и Украины с ошибкой измерения 20 % и систематизированные инструментальные замеры (табл. 1) показали, что диапазон внешних тепловых потерь изменяется до 3 раз для печей одного объема.

ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Тенденция роста величины тепловых потерь от 10 до 30 МВт сопровождается снижением расхода кокса на компенсацию потерь от 57 до 26 кг/т чугуна.

Систематические замеры тепловых потерь на ДП № 9 «АМКР» показали, что в фурменной области тепловые потери изменяются в пределах от 26 до 44 %, в шахте – 18–49 %. Тепловые потери на холодильниках шахты менялись по периметру и во времени очень динамично, что обусловлено оползаниями гарнисажа (рис. 4). Отмечены в течение нескольких суток неравномерные распределения потерь теплоты по периметру печи.

На ДП № 9 ПАО «АМКР» длительное время наблюдалось массовое горение воздушных фурм с прогаром «снизу», характерным при загромождении горна. Количество сгоревших фурм при их диаметре 180 мм достигло 600 шт./год. При выдувке печи на капитальный ремонт 1-го разряда было установлено: при чистых стенках горна по периметру его центральная часть оказалась загроможденной столбом кокса, пропитанного вязким шлаком. После ремонта печь работала в аналогичных условиях на фурмах диаметром 165 мм. Повторный осмотр горна при очередном капитальном ремонте установил его нормальное состояние (1989 г.). Центр горна был свободен, а стенки в межфурменных пространствах покрыты только гарнисажем. Количество сгоревших фурм уменьшилось до 174 шт./год.

Нестабильность теплового потока, а также отсутствие его надлежащего контроля привело к аварии на ДП № 9 ПАО «АМКР» (2011 г.). Таким образом, для мониторинга теплового режима доменной печи необходимо контролировать те-

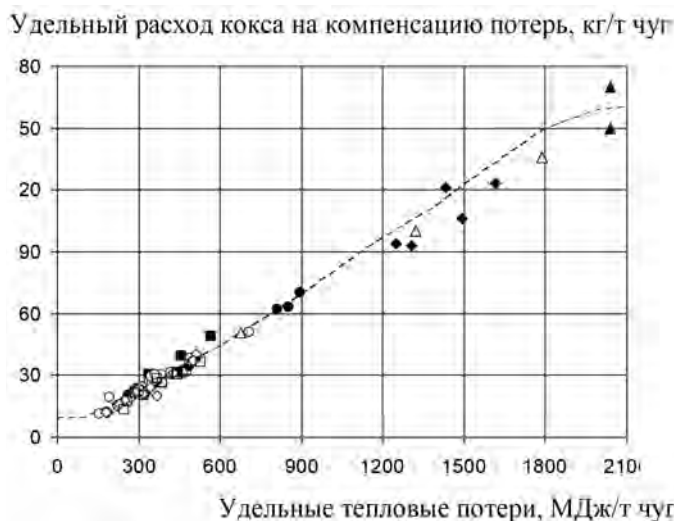


Рис. 3. Зависимость расхода кокса на компенсацию теплотерь от величины удельных потерь теплоты:

- – ДП V = 250 м³; ◆ – ДП Bell@Siemence;
- △ – ДП по И. А. Соколову; ▲ – ДП (Fe-Mn);
- – ДП V = 1000 м³; ○ – ДП V = 2000 м³;
- ◇ – ДП V = 3000 м³; □ – ДП V = 5000 м³;
- (--) – обобщенная

пловые нагрузки как по высоте, так и по окружности шахты.

Интегральными параметрами, которые показали себя наиболее надежными и чувствительными к изменению технико-экономических показателей доменной плавки, являются внешние тепловые потери в системе охлаждения, расход кокса на их покрытие и температура колошникового газа.

При нормальном режиме доменной плавки увеличение общей тепловой мощности и производства чугуна сопровождаются увеличением абсолютной величины внешних тепло-

Таблица 1

Сравнение показателей внешних потерь при увеличении объема ДП

Показатель плавки	Результаты измерения			
	Минимальное	Максимальное	Среднее	Число замеров
ДП 1000м³				
Q _{прп} (МВт/ МДж/т чугу)	6 / 262	15 / 2372	10 / 522	11
K _{пр} , кг/т чугу	20	239	57	
ДП 2000м³				
Q _{прп} (МВт/ МДж/т чугу)	8 / 155	23 / 710	15 / 357	27
K _{пр} , кг/т чугу	11	51	27	
ДП 3000м³				
Q _{прп} (МВт/ МДж/т чугу)	10 / 179	27 / 54	17 / 315	17
K _{пр} , кг/т чугу	12	40	22	
ДП 5000м³				
Q _{прп} (МВт)	14	45	30	12
q, МДж/т чугу	300	829	384	
K _{пр} , кг/т чугу	20	67	26	

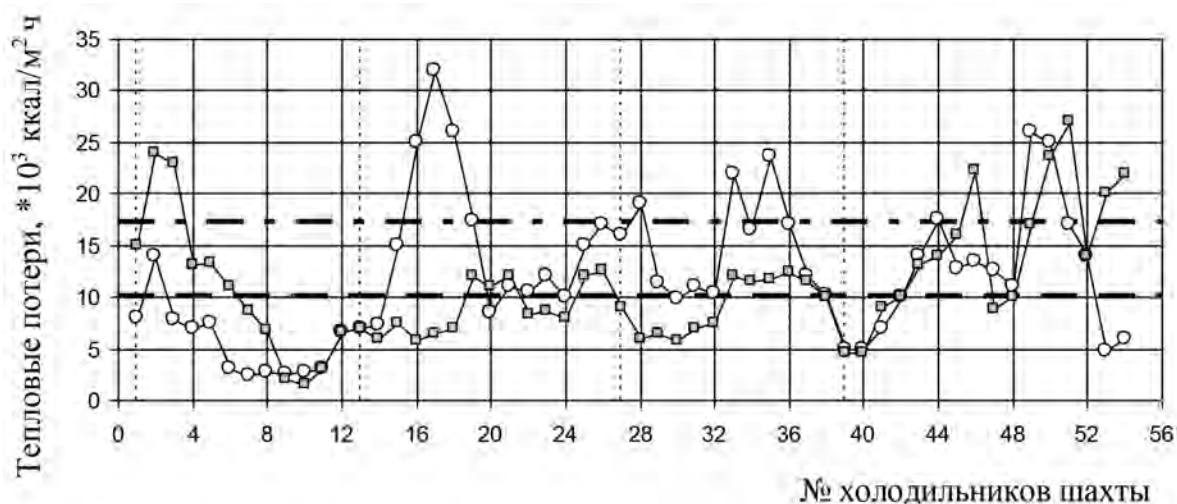


Рис. 4. Тепловые нагрузки на плитовые холодильники доменной печи 5000 м³ по замерам 08.02.79 (□) и 14.02.79 г. (○). Норма института Сантехпроект для холодильников 3-го разряда (— • —) и на остальные ряды шахты (— —); чугуновые летки № 1-4 (---)

вых потерь, уменьшением удельной их величины и расхода кокса на их покрытие. Увеличение тепловых потерь, которое сопровождается увеличением величины расхода кокса на их покрытие, является индикатором нерационального режима доменной плавки и возможного расстройтва в тепловой работе печи. Это объясняется тем, что рост тепловых потерь напрямую связан с интенсивностью ведения доменной плавки. Таким образом, на рост тепловых потерь оказывает влияние перераспределение газового потока к периферии или изменение качества шихты, что может приводить к перерасходу кокса и расстройтвам в работе печи. Обратная тенденция одновременного уменьшения тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие может указывать на перераспределение газового потока к оси или увеличение толщины гарнисажа.

Предложен новый метод оценки теплового состояния доменной печи (разогрев, похолодание, нормальный ход), который проходит опытно-промышленное испытание в условиях ПАО «АМКР».

Для этого проектируемая АИС (рис. 5) должна обеспечивать сбор информации о температуре и расходе воды на входе и выходе системы охлаждения. Формирование базы данных по тепловым потерям реализуется на основании взаимосвязи рассматриваемой величины с теплоэнергетическими показателями работы доменной печи [5]. Полученный статистический материал является исходным для расчета расхода кокса на потери в соответствии с формулой, предложенной И. Д. Семикиным [2]. Взаимные тренды указанных величин позволяют оценить нормальный, нерациональный режим и пере-

ход на центральный ход печи, разогрев или похолодание печи. Иллюстрированное на видеокadre рис. 6 уменьшение (увеличение) внешних потерь на ДП № 9 связано с ее остановкой (раздувкой). При достижении указанных технологических режимов система выдает информационное сообщение, поясняющее ситуацию, а также прогноз ее развития. Оценив характер изменений, определяют их причины (на основании анализа газодинамического режима, а также оценки температурно-тепловых нагрузок по периметру и высоте печи).

Предупреждающий сигнал о разогреве/похолодании, «расстройстве» в работе печи при резком колебании величины внешних тепловых потерь на 1 МВт и более формируется в течение 1 часа с учетом инерционности процесса. За счет этого исключается влияние случайных возмущений, которые не отображают динамику системы в целом, а определяются особенностями технологии, например, цикличностью загрузки, переходом с одного воздухонагревателя на другой, открыванием леток.

Эффективность АИС контроля внешних тепловых потерь определяется выявлением на ранних стадиях (за 2-8 часов) характера «расстройств» в тепловой работе печи, что позволяет уменьшить расход кокса (уменьшение тепловых потерь на 1 МВт сокращает расход кокса до 0,6 % в зависимости от исходной величины расхода кокса на выплавку чугуна); а также оценкой изменений в тепловом режиме печи, когда они еще не выявлены по другим признакам. В совокупности это позволяет повысить точность прогноза показателей плавки на 2-5 %, а также совершенствовать приемы контроля теплового состояния группы доменных печей на уровне цеха.

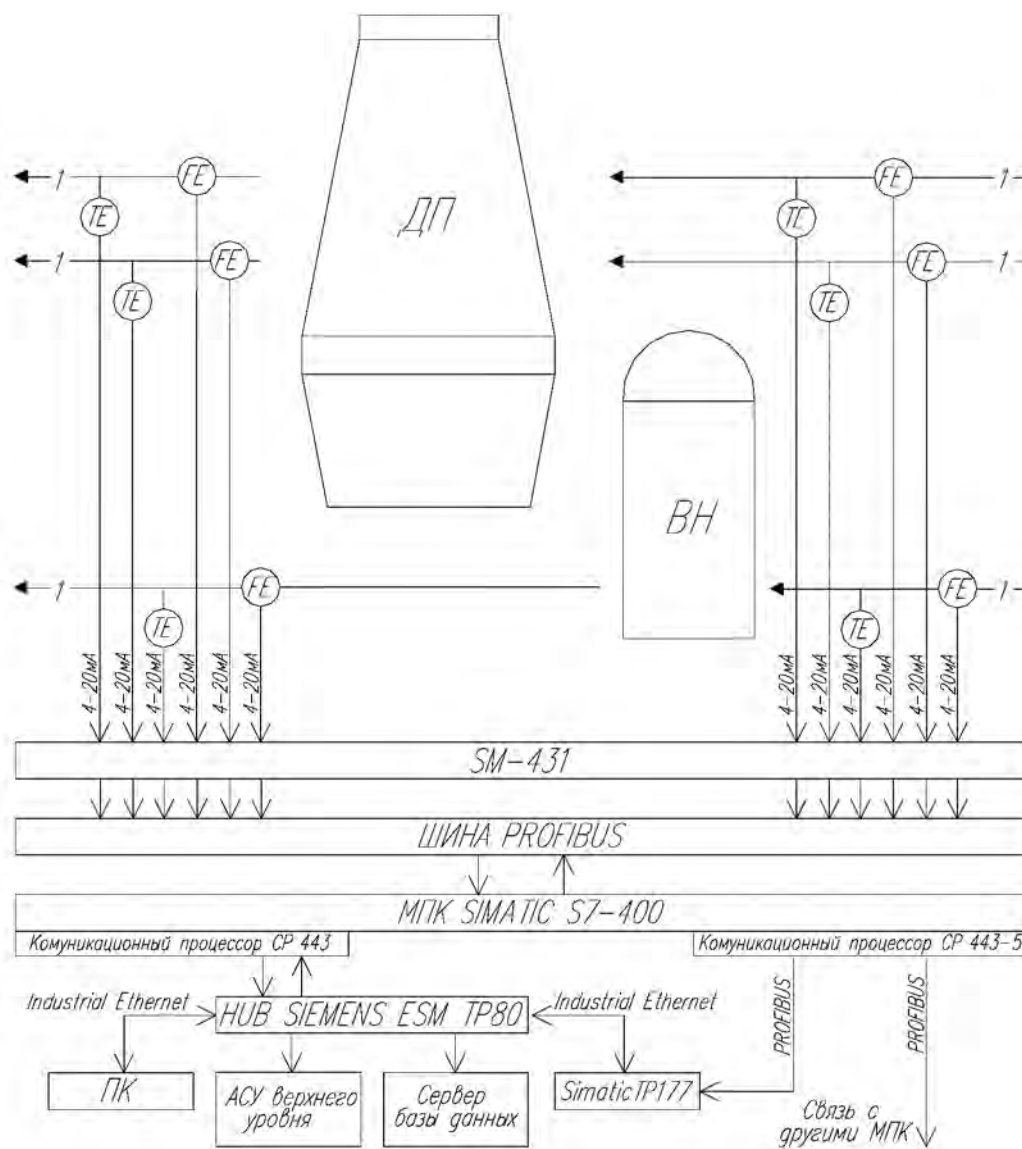


Рис. 5. Структурная схема АИС контроля внешних тепловых потерь: ДП – доменная печь, ВН – воздухонагреватель

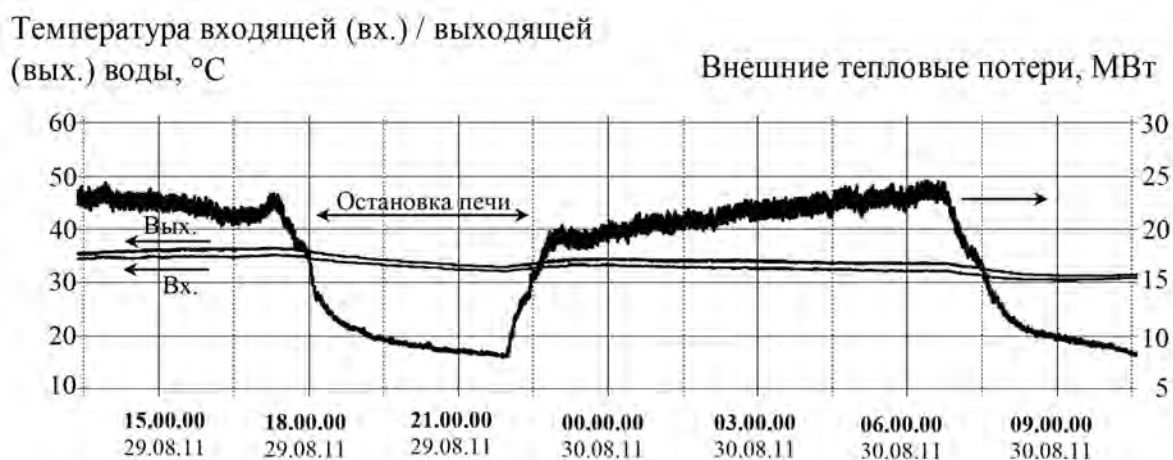


Рис. 6. Изменение внешних тепловых потерь в системе охлаждения, перепада температуры охлаждающей воды на ДП № 9 ПАО «АМКР»

Выводы

1. Форсирование доменной плавки приводит к увеличению объема производства и внешних тепловых потерь, снижению удельной величины тепловых потерь и расхода кокса на покрытие потерь. Тепловые потери зависят от длительности кампании, профиля и тепловой мощности, состояния футеровки печи, газораспределения и теплового режима плавки.

2. Величина внешних тепловых потерь доменных печей по результатам инструментальных измерений составляет 10–50 МВт. Расход кокса на потери изменяется от 20–30 кг/т чугуна в начале кампании до 40–50 кг/т чугуна перед выдувкой. Уменьшение потерь определяет экономию кокса ~10–20 кг/т чугуна.

3. Систематическими замерами тепловых потерь на ДП № 9 «АМКР» выявлены режимы плавки, когда тепловые потери на холодильниках шахты менялись по периметру и во времени очень динамично, что обусловлено оползаниями гарнисажа. Нестабильность теплового потока, а также отсутствие его контроля привело к аварии на ДП № 9 ПАО «АМКР».

4. Предложен новый метод оценки теплового состояния доменной печи (разогрев, похолодание, нормальный ход) при совместном рассмотрении информации о тепловых потерях рабочего пространства и расхода кокса на их компенсацию, который проходит опытно-промышленные испытания в составе автоматизированной системы управления ДП № 9 ПАО «АМКР».

*Светлой памяти учителя,
БОРЦА в науке и в жизни*

Библиографический список / References

1. Демин Г. И. Тепловая работа доменных печей / Г. И. Демин // Доменное и агломерационное производство. Научные труды Днепропетровского металлургического института. Вып. VII. – Днепропетровск: Металлургиздат, 1940. – С. 119–130.

Demin G. I. (1940). *Teplovaya rabota domennykh pechey* [The thermal operation of blast furnaces]. *Blast-furnace and sinter plant. Proceedings of the Dnepropetrovsk Metallurgical Institute*, vol. 7, pp. 119–130.

2. Бородулин А. В. Домна в энергетическом измерении / А. В. Бородулин, А. Д. Горбунов, В. И. Романенко, С. П. Суцев. – Днепропетровск, 2006. – 450 с.

Borodulin A. V., Gorbunov A. D., Romanenko V. I., Sushchev S. P. (2006). *Domna v energeticheskom izmerenii* [Blast furnace in the energy measurement]. *Dneprdzerzhinsk*, 450 p.

3. Кожух В. Я. Контроль потерь тепла в доменной печи / В. Я. Кожух // Сталь. – 1965. – № 4. – С. 298–301.

Kozhuh V. Y. (1965). *Kontrol poter tepla v domennoy pechi* [Controlling heat loss in the blast furnace]. *Steel*, vol. 4, pp. 298–301.

4. Кудинов Г. А. Охлаждение современных доменных печей / Г. А. Кудинов. – М.: Металлургия, 1988. – 254 с.

Kudinov G. A. (1988) *Ohlazhdenie sovremennykh domennykh pechey* [Cooling modern blast furnaces]. Moscow, Metallurgy, 254 p.

5. Большаков В. И. Патент 104228 С2, МПК (2013.01) С21В 5/00 Спосіб контролю ходу доменної печі / В. І. Большаков, О. В. Бородулін, О. Л. Чайка, О. І. Швачка; Інститут чорної металургії НАНУ. № а 2012 09096; заявл. 24.07.2012; опубл. 10.01.2014, бюл. № 1.

Bolshakov V. I., Borodulin O. V., Chayka O. L., Shvachka O. I. e. a. *Sposib kontrolyu hodu domennoyi pechi* [The method of monitoring the course of a blast furnace]. Patent UA, no. 104228, 2014.

Purpose. Execute settlement and analyzes of external heat loss in water cooling system, the nature of their changes during the furnace campaign, the impact on the performance of melting, the use of external thermal heat loss information to control the heat of the furnace condition. Creating tools for monitoring and control of the domain process based on in-depth analysis of the blast furnace structures and systems to improve the efficiency of energy saving in industry.

Methodology. Instrumental measurements on existing furnaces, the choice of representative data, the definition of variables, heuristic techniques.

Findings. The studies of the heat loss of the peripheral zone of blast furnaces. Installed transient thermal loads on the shaft refrigerators, and identified the need to go to the macro-control losses. A Automated Information System (AIS) control of external heat losses and consumption of coke on their surface and describes a method of evaluating the heat of the furnace condition. It is shown that by reducing the heat loss in the cooling system reserves are decreasing coke consumption.

Originality. A new method for the thermal state of blast furnace evaluation (heating, cooling, normal flow). According to the results of analytical and instrumental investigations of heat of the blast furnace is used generically Thermal works- specific heat loss and the specific consumption of coke on their compensation, according to the current value of which is controlled by the thermal state of the furnace. The regularities determine the changes in the thermal oven mode when they have not revealed other grounds, improve the accuracy of prediction of melting indicators allow improved control techniques thermal state of the group Domain shop ovens and prevent changes in their work.

Practical value. Expediency control heat loss in the cooling system and coke consumption in their coverage groups blast furnace shop to assess the effectiveness and reduce the coke consumption of equivalent fuel for smelting iron, safety performance and service life of the fence. A method for monitoring the thermal state of the furnace with external heat losses and consumption of coke on their compensation, aired on pilot tests.

Key words: blast furnace, heat loss, unsteadiness, guard, skull, automation, information system.

Рекомендована к публикации
д. т. н. А. К. Таракановым

Поступила 14.06.2016