

УДК 669.162.24

ЭКСПЕРТНЫЙ МОДУЛЬ СИСТЕМЫ ТЕРМОЗОНДОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЗАГРУЗКОЙ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Ю. С. Семенов^{1,2}, Е. И. Шумельчик^{1,2}, В. В. Горупаха^{1,2}

¹ Институт черной металлургии НАН Украины (г. Днепр, Украина),

² ООО «Научно-техническое предприятие ДЧМ» (г. Днепр, Украина)

Для доменных печей, оборудованных бесконусным и конусным загрузочным устройством, при работе в разных газодинамических и топливных условиях установлены оптимальные диапазоны изменения показателей распределения газового потока. Разработан и прошел опытно-промышленное опробование экспертный модуль системы контроля температур газового потока над поверхностью шихты для управления загрузкой на двух доменных печах.

Ключевые слова: доменная печь, термозонд, управление загрузкой доменной печи, окатыши, пылеугольное топливо.

Доменные печи (ДП) металлургических предприятий Украины в последние годы работают в нестабильных топливно-сырьевых условиях, что требует совершенствования технологических решений [1 – 4]. Современный уровень автоматизации открывает широкие возможности для гибкой адаптации применяемых решений к современным условиям на основе разработки новых способов управления процессами. В настоящей статье приведены последние разработки управления доменной плавкой с использованием современных автоматизированных средств контроля.

Для эффективного выбора и оценки режимов загрузки ДП необходима адекватная информация о распределении газового потока по радиусу и окружности, которое, как правило, оценивают по показаниям стационарных термозондов и/или химическому составу газа, получаемого с помощью газоотборных машин [5, 6].

Некоторые ДП украинских и зарубежных металлургических предприятий оснащают системой зондов для отбора проб газов с целью последующего контроля их распределения над или под поверхностью засыпи шихты, а иногда и одновременно с определением температур в точках контроля. В большинстве случаев химический анализ проб газов выполняется вручную в заводской лаборатории после их отбора в нескольких точках радиуса. Этот процесс требует значительных трудозатрат и времени, поэтому анализ обычно выполняется один раз в сутки. На некоторых ДП измерения выполняют автоматизированными газоанализаторами, что уменьшает трудоемкость и увеличивает оперативность получения информации, однако также осуществляются, как правило, раз в сутки [5]. Такими автоматизированными установками анализа химического состава газов по радиусам печи и общего газа перед газоочисткой оснащены только три ДП в Украине, а также ряд зарубежных печей. С помощью этих систем возможна оценка изменения важного показателя эффективности применяемых режимов загрузки — степени использования восстановительной способности газов в печи по радиусам ДП [5].

Главным недостатком зондов с отбором проб газа при ручном химическом анализе является дискретность получения информации, это может негативно отражаться на принятых впоследствии решениях по

управлению процессом на основе полученного анализа газов, поскольку велика вероятность поступления недостоверной информации как с учетом неточности химического анализа, так и при зондировании шихтовых материалов без соблюдения регламента отбора проб в разнородных слоях столба шихты. Соблюдение регламента отбора проб газа, который предусматривает введение в столб шихты зонда с четкой привязкой к режиму загрузки, также не гарантирует однотипности зондирования вследствие практически невозможного учета реальной скорости схода шихты. Этот недостаток нивелируется непрерывным определением химического анализа газов автоматизированными установками, однако из-за их дороговизны они не получили широкого применения на доменных печах Украины.

В последние годы на большинстве ДП Украины устанавливают системы стационарных термозондов, позволяющие получать информацию об изменении температуры газов над поверхностью шихты в печи по одному или нескольким диаметрам колошника в непрерывном режиме. Преимущества и недостатки стационарных термозондов детально освещены в работах [6 – 9].

В большинстве публикаций, посвященных контролю температур газового потока над поверхностью шихты в ДП, приводится описание конструктивных особенностей разных термозондов, особенностей их охлаждения и постулируется необходимость непрерывного контроля температур [10, 11]. При этом практически отсутствуют сведения об исследованиях влияния технологических факторов на характер изменения температур газового потока над поверхностью засыпи шихты, а также о способах управления распределением шихтовых материалов с использованием информации термозондов. Сложившаяся ситуация обусловила актуальность проводимых исследований.

Показателем оценки распределения шихтовых материалов по радиусам ДП, необходимым для принятия решений по корректировке режимов загрузки, являются рудные нагрузки по радиусу ДП. Распределение рудных нагрузок по радиусу непосредственно связано с распределением CO_2 [4, 9, 12]. Оценка распределения рудных нагрузок по информации, получаемой термозондами, основана на установленной исследо-

Таблица 1. Оптимальные диапазоны изменения показателей распределения газового потока ($K_{min} - K_{max}$)/ K_{cp} для исследуемых периодов работы ДП полезным объемом 1719 м³ с БЗУ

Показатель распределения газового потока	Режим работы			
	на «безгазовой шихте» с увлажненным дутьем	с ПГ	с ПГ и ПУТ	с ПУТ
K_1	(0,92 – 1,02)/0,97	(0,92 – 1,00)/0,96	(0,99 – 1,10)/1,04	(0,85 – 0,94)/0,89
K_2	(1,63 – 1,81)/1,72	(1,52 – 1,89)/1,70	(1,56 – 1,89)/1,72	(1,61 – 2,14)/1,88
K_3	(0,76 – 0,81)/0,79	(0,78 – 0,88)/0,83	(0,76 – 0,81)/0,78	(0,74 – 0,87)/0,80
K_4	(1,43 – 1,66)/1,55	(1,33 – 1,53)/1,43	(1,33 – 1,51)/1,42	(1,63 – 2,08)/1,85

вателями взаимосвязи между распределением CO₂ и температурой газов над поверхностью засыпи шихты по радиусу печи [4, 9, 12].

В публикации [8] авторами данной статьи были освещены первые результаты исследований по рассматриваемой тематике, предложены температурные показатели распределения газового потока ($K_1 - K_4$), определяемые по соотношениям температур в разных зонах сечения печи. Показатели четырех основных характеристик температур газового потока над поверхностью шихты: развитие периферийного K_1 и осевого K_2 газовых потоков, газопроницаемость промежуточной зоны K_3 и ширина осевой коксовой отдушины K_4 . Предложен показатель эффективности плавки e , с использованием которого были установлены оптимальные диапазоны изменения показателей распределения газового потока для ДП-3 полезным объемом 1719 м³, оборудованной бесконусным загрузочным устройством (БЗУ), в условиях использования в технологии плавки пылеугольного топлива (ПУТ) в количестве 130 кг/т чугуна [8]. На основании анализа оптимальных диапазонов изменения показателей распределения газового потока сформулированы требования к распределению шихтовых материалов при вдувании в горн ПУТ для исследуемого объекта [8]. Распределение температур газового потока над поверхностью засыпи шихты доменной печи, соответствующее оптимальным диапазонам

изменения температурных показателей при вдувании ПУТ, представлено на рис. 1.

Объектами исследований данной работы являются ДП-3, оборудованная БЗУ, ДП-5 полезным объемом 1513 м³ и ДП-9 полезным объемом 1386 м³, оборудованные типовыми конусными загрузочными устройствами (КЗУ). Все рассматриваемые ДП оснащены четырьмя охлаждаемыми азотом (ДП-3 и ДП-5) и паром (ДП-9) термозондами украинского производства.

На первом этапе выполнены исследования по установлению оптимальных диапазонов изменения показателей распределения газового потока для трех режимов работы ДП-3, предшествующих полному переходу на ПУТ: 1 — на «безгазовой шихте» с увлажненным дутьем (24.01 – 23.02.2016); 2 — с природным газом (ПГ) (16.03 – 18.04.2016), 3 — с ПГ и с ПУТ (01.05 – 29.05.2016). Показатель e для периодов работы ДП рассчитывали по алгоритму:

1. Определение показателя e для каждого суток относительно средних значений суточного производства печи и суммарного расхода топлива в рамках календарного месяца.

2. Определение e с использованием принципа скользящего среднего средних значений e за 30 сут работы печи.

3. Выбор из массива, полученного по п. 2, лучшего периода длительностью 30 сут по максимальному значению e .

4. Определение средних значений суточного производства печи и суммарного расхода топлива в выбранном по п. 3 лучшем периоде.

5. Расчет ежесуточных значений показателя e каждого из исследуемых периодов относительно полученных согласно п. 4 средних значений суточного производства печи и суммарного расхода топлива.

Для первого периода величины суточного производства печи и суммарного расхода топлива, относительно которых рассчитывали показатель e (в соответствии с п. 5 алгоритма), составили 2633 т и 593 кг/т чугуна, для второго периода — 3083 т и 559 кг/т чугуна, для третьего — 3321 т и 561 кг/т чугуна. По среднесуточным показателям распределения газового потока при $e > 1,0$ определили средние значения показателей $K_1 - K_4$. Диапазоны изменения $K_1 - K_4$, принятые в качестве рациональных, определяли согласно $K_i \pm \sigma$, где $i = 1 - 4$; σ — среднеквадратические отклонения показателей от их средних значений, удовлетворяю-

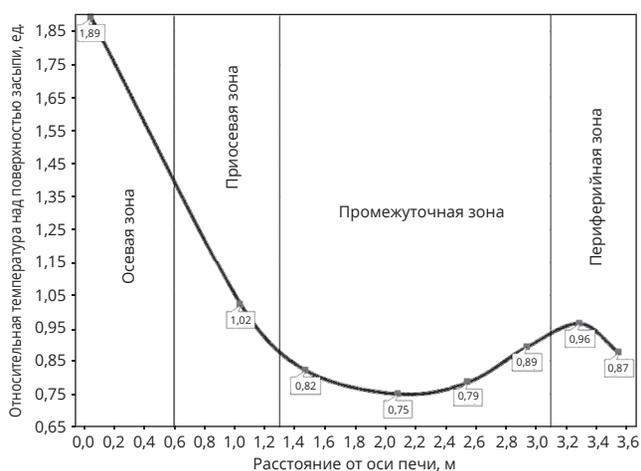


Рис. 1. Рациональное распределение температур газового потока над поверхностью засыпи по радиусу колошника ДП-3 при использовании в технологии плавки ПУТ в количестве 130 кг/т чугуна

Таблица 2. Оптимальные диапазоны изменения показателей распределения газового потока ($K_{\min} - K_{\max}$)/ $K_{\text{ср}}$ для исследуемых периодов работы ДП полезным объемом 1513 м³ с КЗУ

Показатель распределения газового потока	Режим работы		
	на «безгазовой шихте» с увлажненным дутьем	с ПГ и ПУТ	с ПУТ
K_1	(0,83 – 0,91)/0,87	(0,65 – 0,86)/0,75	(0,64 – 0,75)/0,70
K_2	(1,45 – 1,85)/1,65	(1,57 – 2,11)/1,84	(1,63 – 2,42)/2,02
K_3	(0,76 – 0,84)/0,80	(0,79 – 0,87)/0,83	(0,73 – 0,87)/0,80
K_4	(0,98 – 1,54)/1,26	(1,12 – 1,46)/1,29	(1,18 – 1,93)/1,56

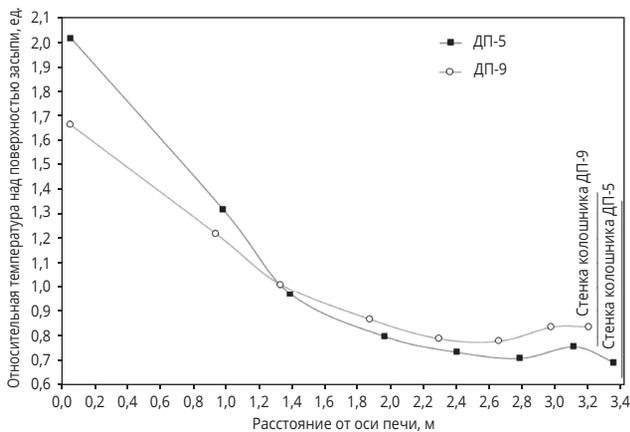


Рис. 2. Рациональные распределения температур газового потока над поверхностью засыпи по радиусу колошника ДП-5 и ДП-9 при использовании в технологии плавки ПУТ в количестве 82 и 145 кг/т чугуна соответственно

щих условию $e \geq 1,0$ в анализируемой выборке [7]. В табл. 1 представлены оптимальные диапазоны изменения показателей распределения газового потока для всех исследуемых периодов работы ДП-3, в том числе и для периода с ПУТ (11.01 – 21.11.2016), детально рассмотренного в [8, 13, 14].

На втором этапе аналогичные исследования выполнили для ДП-5 полезным объемом 1513 м³, оборудованной КЗУ, того же, что и ДП-3, металлургического завода с определением оптимальных диапазонов изменения показателей распределения газового потока по радиусу печи. Оптимальные диапазоны для трех основных газодинамических режимов работы ДП-5 определяли тем же методом, что и примененный для ДП-3: на «безгазовой шихте» с увлажненным дутьем (01.01 – 29.02.2016); с природным газом и ПУТ (01.03 – 30.06.2016); с ПУТ (12.11.2016 – 18.02.2017). Во втором исследуемом периоде работы ДП-5 расходы ПГ и ПУТ составили 15,1 м³/т чугуна и 75,3 кг/т чугуна соответственно. В третьем периоде расход ПУТ составил 82,0 кг/т чугуна. Для первого периода величины суточного производства печи и суммарного расхода топлива, относительно которых рассчитывали показатель e , составили 2544 т и 595 кг/т чугуна, для второго периода – 2776 т и 584 кг/т чугуна, для третьего – 2748 т и 545 кг/т чугуна. В табл. 2 представлены оптимальные диапазоны изменения показателей распределения газового потока для исследуемых периодов работы ДП-5.

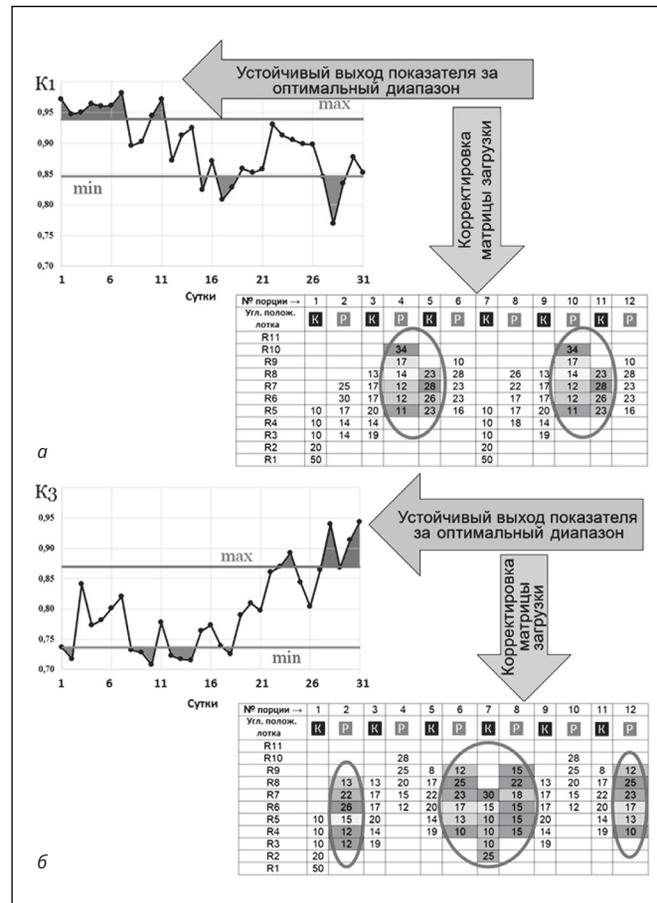


Рис. 3. Видеокадры (а, б) экспертного модуля управления нагрузкой ДП-3 с БЗУ

На третьем этапе исследования были выполнены для ДП-9 другого металлургического комбината с установлением оптимальных диапазонов изменения показателей распределения газового потока по радиусу печи. В исследуемом периоде 01.01 – 30.06.2018 печь работала с использованием ПУТ от 130 до 160 кг/т чугуна. Для исследуемого периода суточные производства печи и суммарный расход топлива, относительно которых рассчитывали показатель e , составили 2581 т и 551 кг/т чугуна соответственно. Оптимальные показатели распределения газового потока $\min - \max/\text{сред.}$ для исследуемого периода работы (172 сут) ДП-9 полезным объемом 1386 м³ с КЗУ: $K_1 = (0,78 - 0,90)/0,84$; $K_2 = (1,52 - 1,81)/1,67$; $K_3 = (0,83 - 0,89)/0,86$; $K_4 = (1,26 - 1,48)/1,37$. Для данного объекта исследований величина расхода ПУТ не влияла существенно



Рис. 4. Видеокадр экспертного модуля управления загрузкой ДП-9 с КЗУ

на оптимальные диапазоны изменения температурных показателей. На рис. 2 представлены графики распределения температур газового потока над поверхностью засыпи шихты для ДП-5 и ДП-9 при вдувании ПУТ, соответствующие оптимальным диапазонам изменения температурных показателей K_1 – K_4 .

Как видно из рис. 2, на ДП-5 наблюдается более развитая осевая коксовая отдушина при расходе суммарного топлива 546 кг/т чугуна, большем на 23 кг/т чугуна, чем на ДП-9 (523 кг/т чугуна), при близких КИПО: 0,51 на ДП-5 и 0,49 на ДП-9. Это объясняется работой ДП-9 с большей рудной нагрузкой на колошнике при большем расходе ПУТ, что создает предпосылки для большего попадания рудных материалов к центру печи при ограниченных возможностях КЗУ; кроме того, ДП-9 работает без отсева железорудных материалов и, следовательно, с большим верхним перепадом давления (15 кПа на ДП-5, 27 кПа на ДП-9), что способствует ухудшению газопроницаемости и перераспределению газового потока. Более экономичный режим работы ДП-9 при менее развитой осевой отдушине объясняется использованием кокса лучшего качества (CSR кокса: 48,4 % на ДП-5, 52,9 % на ДП-9) и меньшего количества известняка в шихте (50,6 на ДП-5 и 10,5 кг/т чугуна на ДП-9).

На основании установленных оптимальных диапазонов изменения температурных показателей для технологии плавки с использованием ПУТ разработан и прошел опытно-промышленное опробование экспертный модуль системы термозондов для управления загрузкой ДП-3 в 2016 г. и ДП-9 в 2018 г. Экспертный модуль включает расчет, а также отображение в виде графиков показателей распределения газового потока и выдачу рекомендаций по корректировке режима загрузки в режиме реального времени при устойчивом выходе показателей распределения из оптимального диапазона.

На рис. 3 представлены видеокадры разработанного экспертного модуля для ДП-3 при выходе показателей распределения за границы оптимального диапазона. Как видно из рис. 3, при устойчивом выходе (более четырех суток подряд) температурных показателей из оптимального диапазона их изменения технологу выдается рекомендация по корректировке матрицы загрузки. Варианты матриц загрузки для экспертного модуля разработаны с помощью модельной системы

ИЧМ [15]. Необходимый набор матриц загрузки входит в блок генерации рекомендаций, являющийся составляющим элементом экспертного модуля.

Для условий ДП-9, учитывая ограниченные возможности КЗУ по управлению распределением шихтовых материалов в печи, рекомендации по корректировке режимов загрузки основаны на использовании разных сочетаний прямых и обратных подач в цикле. Видеокадры разработанного экспертного модуля при выходе показателей распределения температур газового потока за границы установленного оптимального диапазона представлены на рис. 4.

При работе экспертного модуля в режиме реального времени необходима корректировка границ оптимальных диапазонов температурных показателей при существенных изменениях технологии доменной плавки, в частности, после капитальных ремонтов с шоткретированием шахты ДП и/или после замены холодильных плит системы охлаждения, замены термозондов, при изменении дутьевых добавок, кардинальном изменении состава шихтовых материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для доменных печей, оборудованных бесконусным и конусным загрузочным устройством, установлены оптимальные диапазоны изменения температурных показателей распределения газового потока по радиусу при работе доменных печей в разных газодинамических и топливных условиях: при работе на «безгазовой шихте» на увлажненном дутье, с природным газом, с природным газом и пылеугольным топливом, с пылеугольным топливом. Разработан и прошел опытно-промышленное опробование экспертный модуль системы контроля температур газового потока (системы термозондов) над поверхностью шихты в доменной печи, генерирующий корректирующие воздействия режима загрузки при выходе показателей распределения температур за оптимальный диапазон их изменения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Semenov Yu. S., Mozhareno N. M., Gorupakha V. V.** et al. Effect of the Fuel, Raw Materials, and Process Conditions on the Behavior of Temperature Change in a Blast-Furnace Lining // Metallurgist. July 2015. Vol. 59. Issue 3 – 4. P. 290 – 299.
2. **Большаков В. И., Семенов Ю. С., Шумельчик Е. И.** и др. Реализация энергосберегающей технологии загрузки современной доменной печи в конъюнктурных топливно-сырьевых и технологических условиях // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2014. № 6. С. 6 – 14.
3. **Semenov Yu. S., Shumel'chik E. L., Gorupakha V. V.** et al. Monitoring Blast Furnace Lining Condition During Five Years of Operation // Metallurgist. July 2017. Vol. 61. Issue 3 – 4. P. 291 – 297.
4. **Тараканов А. К., Лялюк В. П., Кассим Д. А.** и др. Согласованное управление распределением шихтовых материалов на колошнике и газового потока в горне доменной печи // Сталь. 2018. № 6. С. 2 – 5.
5. **Большаков В. И.** Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. — Киев : Наукова думка, 2007. — 412 с.

6. **Семенов Ю. С.** Новые подходы в управлении загрузкой доменной печи, оборудованной БЗУ, в современных условиях работы // Познание процессов и развитие технологии доменной плавки: коллективный труд второго международного симпозиума под науч. ред. докт. техн. наук, проф. И. Г. Товаровского. — Днепр : Журфонд, 2016. С. 272 – 285.
7. **Большаков В. И., Семенов Ю. С., Шумельчик Е. И.** и др. Использование информации о температуре над поверхностью засыпи шихты для контроля доменной плавки // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 3. С. 2 – 7.
8. **Semenov Yu. S., Shumel'chik E. I., Horupakha V. V.** et al. Using Thermal Probes to Regulate the Batch Distribution in a Blast Furnace with Pulverized-Coal Injection // *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. № 6. P. 389 – 393.
9. **Semenov Yu. S., Shumel'shik E. I., Gorupakha V. V.** et al. Efficient Management of the Charging of Blast Furnaces and the Application of Contemporary Means of Control Over the Variable Technological Condition/Metallurgist . March 2018. Vol. 61. Issue 11 – 12. P. 950 – 958.
10. **Третяк А. А., Паршаков В. М., Чемикосов М. В.** и др. Достоверность информации о распределении газового потока по радиусу колошника доменной печи, получаемой разными способами измерений // *Черная металлургия* : Бюл. НТИЭИ. 2016. № 11. С. 34 – 40.
11. **Паршаков В. М., Тахаутдинов Р. С., Бодяев Ю. А.** и др. Контроль радиального газораспределения в оборудованных БЗУ доменных печах ММК с помощью многоточечных термозондов // *Сталь*. 2009. № 10. С. 16 – 19.
12. **Большаков В. И., Лебедь В. В.** Исследование взаимосвязи распределения температуры и химического состава газового потока по радиусу доменной печи // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии* : сб. науч. тр. ИЧМ НАН Украины. 2006. № 13. С. 27 – 35.
13. **Podkorytov A. L., Kuznetsov A. M., Zubenko A. V.** et al. Introduction of Pulverized-Coal Injection at Yenakieve Iron and Steel Works // *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. № 5. P. 313 – 319.
14. **Semenov Yu. S.** Temperature Distribution of the Gas Flux in Blast Furnaces // *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. № 7. P. 473 – 477.
15. **Semenov Yu. S., Shumel'chik E. I., Vishnyakov V. I.** et al. Model system for selecting and correcting charging programs for blast furnaces equipped with a bell-less charging apparatus // *Metallurgist*. January 2013. Vol. 56. Issue 9 – 10. P. 652 – 657.