

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДУТЬЕВОГО РЕЖИМА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ В УСЛОВИЯХ ОАО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»

*Е.В. Овчинникова, А.Н. Шаповалов*

**Изучено влияние параметров дутьевого режима на технико-экономические показатели работы доменной печи № 4 ОАО «Уральская Сталь». Установлены оптимальные значения теоретической температуры горения на фурмах и кинетической энергии газовоздушной смеси, обеспечивающие лучшие показатели плавки.**

*Ключевые слова: параметры дутья, показатели доменной плавки, температура горения в фурменном очаге, кинетическая энергия газовоздушной смеси.*

Технико-экономические показатели (ТЭП) работы печи определяются эффективностью использования тепловой и химической энергии газов, которая, в свою очередь, зависит от организации противотока шихты и газа в объеме печи. Все эти показатели находятся в тесной взаимосвязи и зависят от качества шихтовых материалов, их распределения на колошнике, объема, кинетической энергии и температуры фурменных газов, давления под колошником, режима выпусков и других параметров. При постоянстве шихтовых условий, режима выпусков и загрузки можно считать, что распределение газов по сечению печи и использование его полностью определяются параметрами дутья: интенсивностью, давлением, кинетической энергией струи дутья и температурой горения на фурмах.

Для обеспечения наилучших ТЭП плавки параметры дутья должны находиться в оптимальных пределах. Для определения этих пределов в работе были проанализированы среднемесячные показатели работы доменной печи № 4 ОАО «Уральская Сталь» за период с 2006 по 2009 годы. В рассматриваемом периоде печь работала относительно ровно, однако неудовлетворительное состояние футеровки и системы охлаждения распара и нижней части шахты, а также невысокое качество агломерата и кокса являлись факторами, существенно ограничивающими интенсивность плавки. Поэтому при полезном объеме 2002 м<sup>3</sup> средняя удельная производительность за анализируемый период составляла 1,66 т/м<sup>3</sup> в сутки. Показатели работы доменной печи № 4 за рассматриваемый период (без учета периодов проведения кап. ремонт) приведены в таблице.

Из данных таблицы следует, что за рассматриваемый период параметры дутьевого режима изменялись в широких пределах в зависимости от шихтовых условий, текущего состояния печи и производственного плана, что расширяет возможности статистического анализа имеющихся данных.

Основными показателями, характеризующими режим горения топлива у фурм доменной печи

и определяющими газодинамические параметры доменной плавки, являются теоретическая температура горения и кинетическая энергия истекающей из фурм газовоздушной смеси. В ряде работ [1–5] отмечается существование оптимального их уровня, поэтому в работе был проведен анализ влияния этих показателей на ТЭП работы доменной печи № 4 ОАО «Уральская Сталь».

Теоретическую температуру горения ( $t_r$ , °С) определяли по количеству поступающего в зону горения тепла ( $Q_{3Г}$ , кДж/т чугуна) с учетом параметров фурменного газа по уравнению:

$$t_r = \frac{Q_{3Г}}{C_{фГ} V_{фГ}},$$

где  $C_{фГ}$  – теплоемкость фурменного газа, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $V_{фГ}$  – выход фурменного газа, м<sup>3</sup>/т чугуна.

При расчете теплового баланса зоны горения (ЗГ) учитывали тепло горения углерода кокса, природного газа, физическое тепло дутья, физическое тепло поступающего в ЗГ кокса, теплоту диссоциации пара, а также тепло, уносимое из ЗГ золой кокса и фурменными газами.

Кинетическую энергию газовоздушной смеси определяли с учетом параметров дутья, диаметра и количества работающих фурм [6].

Влияние теоретической температуры горения на ТЭП доменной плавки показано на рис. 1. Представленные на рис. 1 данные позволяют заключить, что по влиянию на удельный расход кокса и производительность печи оптимальной является теоретическая температура горения в пределах 2100–2150 °С, причем максимальная производительность обеспечивается при температуре горения 2130–2150 °С, а минимальный расход кокса – при 2100–2120 °С.

Статистической обработкой данных стандартными средствами MS Excel получены уравнения регрессии ТЭП работы доменной печи № 4 от теоретической температуры горения и соответствующие величины коэффициентов множественной корреляции ( $R$ ):

$$P = -0,026t_r^2 + 112,63t_r - 118\,051 \quad (R = 0,44);$$

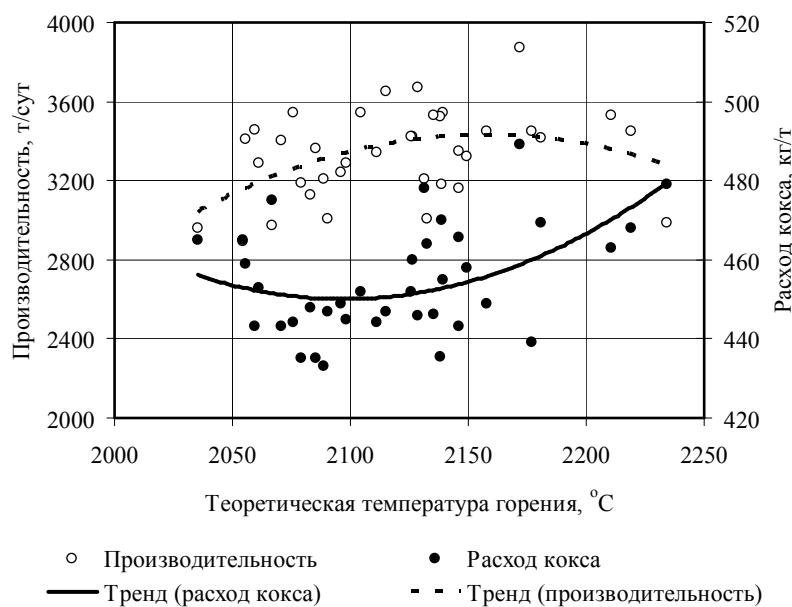
$$K = 0,0016t_r^2 - 6,568t_r + 7337,1 \quad (R = 0,48),$$
 где  $P$  – производительность доменной печи № 4, т/сут;  $K$  – удельный расход кокса, кг/т;  $t_r$  – теоретическая температура горения на фурмах, °С.

Экстремальная зависимость ТЭП работы печи от величины теоретической температуры горения на фурмах объясняется влиянием последней на тепловые и газодинамические условия доменной плавки. Как известно, с ростом  $t_r$  увеличивается

**Усредненные показатели работы доменной печи № 4 ОАО «Уральская Сталь» за 2006–2009 гг.**

Показатели	Значение показателя за период	
	Среднее	Интервал изменения
Производительность, т/ном. сутки	3334,8	2894–3874
Выход шлака, кг/т чугуна	391,9	340–435
Доля агломерата в шихте, %	63,1	46–87
Содержание мелочи в агломерате, %	16,6	15,3–17,7
Расход кокса, кг/т чугуна	454,4	433–489
Прочность кокса, %:		
М25	84,5	83,7–85,2
М10	9,2	8,9–9,6
Расход природного газа, м <sup>3</sup> /т	88,6	64–117
Расход техн. кислорода, м <sup>3</sup> /т	66,8	0–170
Параметры дутья:		
расход, м <sup>3</sup> /мин	3110,1	2671–3417
давление, ати	2,33	1,87–2,66
температура, °С	1099,2	1021–1140
Общий перепад давления*, атм	1,35	0,88–1,57
Степень использования СО, %	45,28	39,81–48,90
Химический состав чугуна, %:		
Si	0,50	0,39–0,66
S	0,015	0,010–0,030
P	0,050	0,020–0,060
Основность шлака, ед.:		
CaO/SiO <sub>2</sub>	1,06	0,99–1,13
(CaO + MgO)/SiO <sub>2</sub>	1,19	1,13–1,26
Температура горения на фурмах, °С	2034,2	1850–2317
Кинетическая энергия газовой смеси, кДж/с	58,42	24,79–113,40

\* Частные перепады давления не фиксируются.



**Рис. 1. Взаимосвязь производительности и удельного расхода кокса с теоретической температурой горения в фурменных очагах**

тепловой потенциал и тепловая работа «низа» печи. При этом за счет увеличения объема фурменных газов растет величина газового напора в нижней части печи, а также происходит перераспределение газов к осевой зоне. Поэтому увеличение  $t_T$  до некоторого предела, определяемого сопротивлением столба шихты в нижней части печи, позволяет интенсифицировать процесс и добиться лучшего использования газового потока, а следовательно, способствует увеличению производительности и снижению расхода кокса. Влияние теоретической температуры горения на возможности форсировки плавки подтверждается экстремальной зависимостью удельного перепада давления ( $\Delta P$ ), приходящегося на 1 м<sup>3</sup> дутья ( $\Delta P/Q_d$ , (Па·мин)/м<sup>3</sup>), от температуры горения (рис. 2). Кроме того, повышение  $t_T$  до определенного уровня обеспечивает улучшение использования химической энергии газа (см. рис. 2).

Зависимости удельных потерь давления ( $\Delta P/Q_d$ , (Па·мин)/м<sup>3</sup>) и степени использования CO ( $\eta_{CO}$ , %) от теоретической температуры горения, полученные при статистической обработке производственных данных, представлены ниже:

$$\Delta P/Q_d = 0,0007t_T^2 - 2,816t_T + 3073,2 \quad (R = 0,56);$$

$$\eta_{CO} = -0,0002 \cdot t_T^2 + 0,8474t_T - 858,36 \quad (R = 0,31).$$

Из рис. 2 следует, что с повышением теоретической температуры горения до 2150 °С удельная величина потерь давления ( $\Delta P/Q_d$ ) в столбе шихты снижается, что позволяет увеличивать расход дутья при неизменном значении общего перепада давления газов в печи ( $\Delta P$ ). Дальнейшее повышение температурного уровня «низа» печи ухудшает газодинамические условия плавки, что ведет к снижению производительности.

Экстремальная зависимость расхода кокса от теоретической температуры горения (см. рис. 1)

объясняется влиянием последней на распределение газа по сечению печи и, как следствие, эффективность его использования (см. рис. 2). Так, с повышением теоретической температуры горения до 2100–2120 °С степень использования CO увеличивается, что обеспечивает возможность уменьшения расхода кокса.

Таким образом, влияние температуры в фурменных очагах на распределение процессов (теплообмена, восстановления, газодинамики, плавления и шлакообразования, движения шихты и жидких продуктов) по высоте и сечению доменной печи выражается через существование оптимальной теоретической температуры горения – для доменной печи № 4 в рассматриваемый период ее уровень составляет 2100–2150 °С.

Наряду с теоретической температурой горения на фурмах на газодинамику доменной печи и показатели ее работы оказывает существенное влияние кинетическая энергия газозвушной смеси. На рис. 3 представлены зависимости показателей доменной плавки от кинетической энергии газозвушной смеси.

Статистической обработкой данных стандартными средствами MS Excel получены уравнения регрессии ТЭП работы доменной печи № 4 с кинетической энергией газозвушной смеси ( $E_{кин}$ ) и соответствующие величины коэффициентов множественной корреляции ( $R$ ):

$$\Pi = -0,1435E_{кин}^2 + 23,766E_{кин} + 2485,9 \quad (R = 0,58);$$

$$K = 0,0037E_{кин}^2 - 0,384E_{кин} + 463,01 \quad (R = 0,18).$$

Анализ представленных на рис. 3 данных свидетельствует о существовании оптимального уровня кинетической энергии газозвушной смеси: 70–80 кДж/с для максимальной производительности и 50–60 кДж/с для обеспечения минимального расхода кокса.

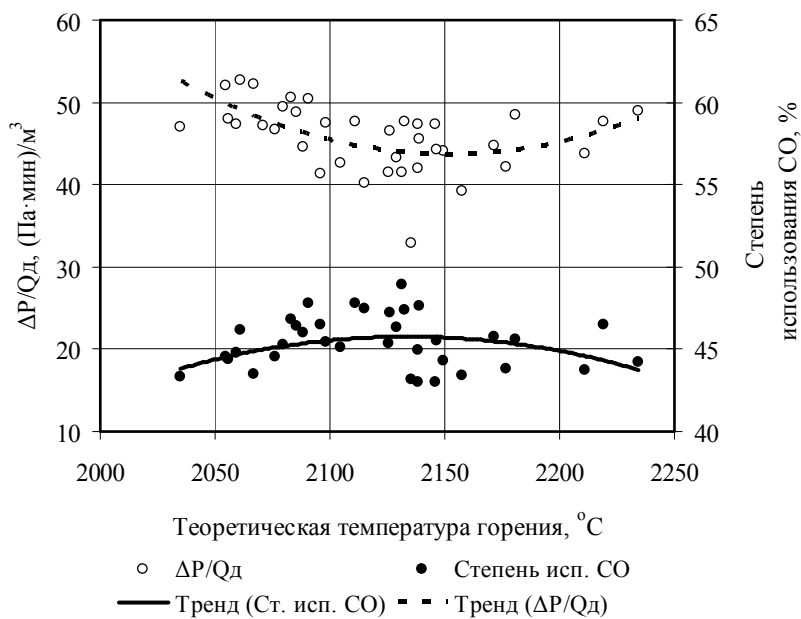


Рис. 2. Влияние теоретической температуры горения в фурменных очагах на удельный перепад давления в печи ( $\Delta P/Q_d$ ) и степень использования CO

Экстремальная зависимость ТЭП работы печи от кинетической энергии газовой струи объясняется влиянием последней на распределение газа по радиусу печи и газодинамические условия плавки в целом. Так, с увеличением кинетической энергии газовый поток смещается к центру печи, что до определенного предела благоприятно сказывается как на использовании его восстановительной способности, так и на величине удельного перепада давления (рис. 4).

Зависимости удельных потерь давления ( $\Delta P/Q_d$ , (Па·мин)/м<sup>3</sup>) и степени использования СО ( $\eta_{CO}$ , %) от кинетической энергии газовой смеси ( $E_{кин}$ ), полученные при статистической обработке производственных данных, представлены ниже:

$$\Delta P/Q_d = 0,0007E_{кин}^2 - 0,1525E_{кин} + 51,935 (R=0,28);$$

$$\eta_{CO} = -0,0006E_{кин}^2 + 0,0608E_{кин} + 44 (R = 0,24).$$

Из рис. 4 следует, что с увеличением кинетической энергии газовой смеси до 80 кДж/с удельные потери давления ( $\Delta P/Q_d$ ) в столбе шихты снижаются, что позволяет форсировать плавку и достигать увеличения производительности при «ровном» ходе печи. В то же время, при текущем качестве шихты и ее распределении, увеличение кинетической энергии газовой смеси выше 60–70 кДж/с приводит к уменьшению использования химической энергии газового потока, и, как следствие, к росту расхода кокса.

Таким образом, в условиях работы доменной печи № 4 в рассматриваемом периоде для дости-



Рис. 3. Взаимосвязь производительности и удельного расхода кокса с кинетической энергией газовой смеси

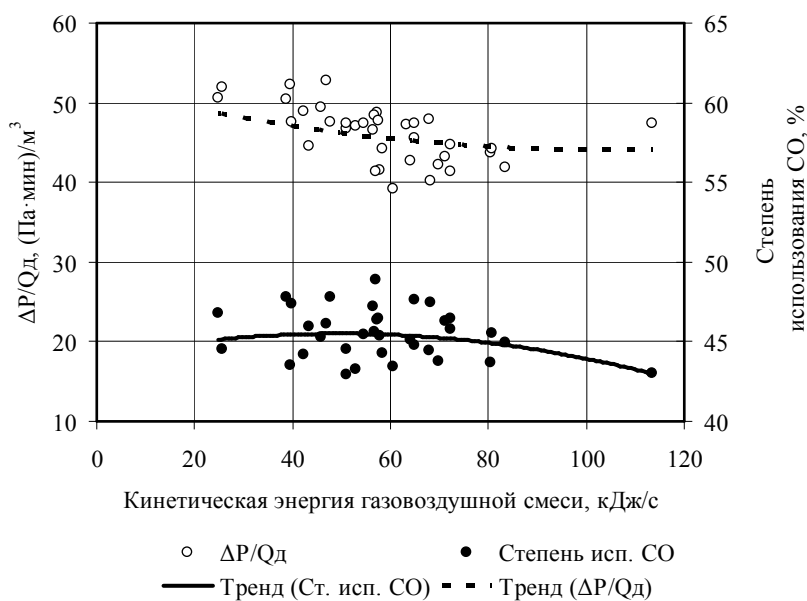


Рис. 4. Влияние кинетической энергии газовой смеси на удельный перепад давления в печи ( $\Delta P/Q_d$ ) и степень использования СО

жения наилучших ТЭП целесообразно ограничивать кинетическую энергию газовой смеси на уровне 60–70 кДж/с и поддерживать теоретическую температуру горения на фурмах в пределах 2100–2150 °С. Средний текущий уровень кинетической энергии (см. таблицу) составляет 58,42 кДж/с, что близко к оптимальному уровню. В этих условиях улучшение ТЭП доменной плавки возможно за счет влияния на температуру горения в фурменных очагах.

Средствами обеспечения оптимального уровня теоретической температуры горения (и кинетической энергии газовой смеси) являются температура дутья и соотношение расходов природного газа и технологического кислорода.

Поскольку основной тенденцией развития технологии доменного процесса является стремление к увеличению температуры дутья, что позволяет эффективно использовать тепловую энергию

доменного газа и возвращать ее в доменную печь, то в работе решалась задача определения оптимального соотношения расходов природного газа и кислорода в дутье (ПГ/О<sub>2</sub>, ед.) при существующем на доменной печи № 4 температурном уровне дутья. Влияние соотношения расходов ПГ/О<sub>2</sub> в дутье на теоретическую температуру горения для доменной печи № 4 представлено на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что при средней температуре дутья за рассматриваемый период 1100 °С, для обеспечения определенной ранее оптимальной температуры в фурменных очагах 2100–2150 °С необходимо поддерживать соотношение расходов природного газа и кислорода в дутье на уровне 1,1–1,8. Для установления более узких пределов ПГ/О<sub>2</sub> в дутье, обеспечивающих максимальную эффективность доменного процесса, было проанализировано влияние этого фактора на ТЭП работы доменной печи №4 (рис. 6).

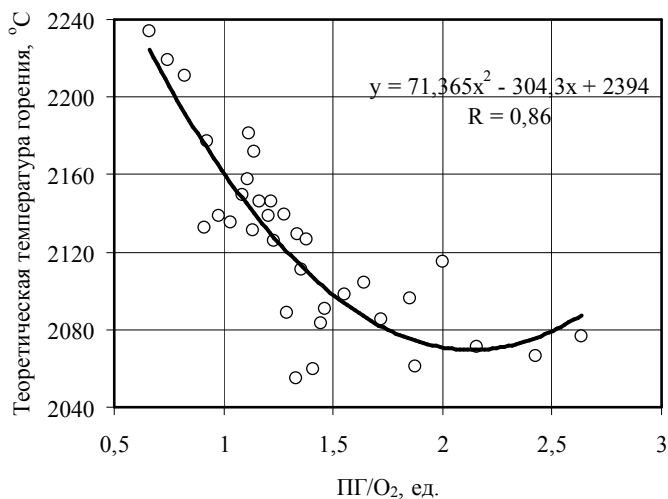


Рис. 5. Влияние отношения ПГ/О<sub>2</sub> в дутье на теоретическую температуру горения на фурмах

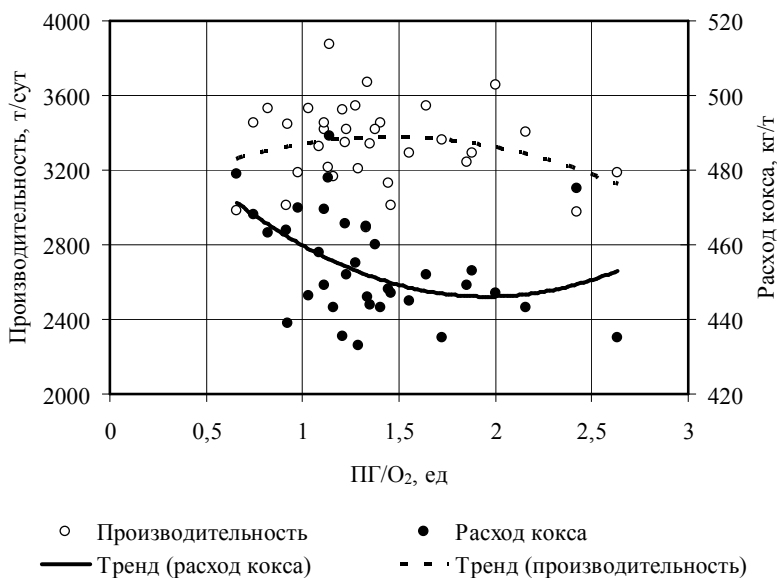


Рис. 6. Влияние отношения ПГ/О<sub>2</sub> в дутье на производительность и расход кокса в условиях работы доменной печи № 4 ОАО «Уральская Сталь»

Зависимости ТЭП доменной плавки от соотношения в дутье природного газа и кислорода ( $\text{ПГ}/\text{O}_2$ ), полученные при статистической обработке производственных данных, представлены ниже:

$$P = -183,83(\text{ПГ}/\text{O}_2)^2 + 535,4 \text{ ПГ}/\text{O}_2 + 2985,6$$

$$(R = 0,25);$$

$$K = 15,02(\text{ПГ}/\text{O}_2)^2 - 58,73 \text{ ПГ}/\text{O}_2 + 503,5$$

$$(R = 0,45).$$

Из представленных на рис. 6 данных следует, что с повышением отношения  $\text{ПГ}/\text{O}_2$  в дутье до определенного предела ТЭП работы доменной печи улучшаются, что объясняется изменением теоретической температуры горения и кинетической энергии газовоздушной смеси. Причем максимальной производительности доменной печи соответствует отношение  $\text{ПГ}/\text{O}_2$  в дутье на уровне 1,1–1,4, а минимальному расходу кокса – 1,6–2,0.

Таким образом, соотношение расходов природного газа и кислорода в дутье должно обеспечивать оптимальную температуру горения (2100–2150 °С) при максимально возможной температуре нагрева дутья. Сопутствующее повышению нагрева дутья увеличение расхода природного газа может значительно увеличить его эффективность, поскольку температурное поле печи сохранится на некотором рациональном уровне. При этом снимаются ограничения в эффективном увеличении температуры дутья сверх некоторого значения, определяемого условиями в шахте печи и температурными условиями в горне. Необходимый дополнительный расход вдуваемых реагентов при повышении нагрева дутья может быть определен из условия постоянства теоретической температуры горения.

С целью определения оптимального соотношения параметров дутьевого режима, обеспечивающих высокие ТЭП работы доменной печи № 4, был проведен регрессионный анализ опытных данных и получены уравнения, позволяющие оценить совместное влияние исследуемых параметров:

$$P = -65\,601,95 - 0,209E_{\text{кин}}^2 + 32,885E_{\text{кин}} - 0,0147t_r^2 + 63,225t_r (R = 0,76);$$

$$K = 7174,644 + 0,006E_{\text{кин}}^2 - 0,7356E_{\text{кин}} + 0,0015 \cdot t_r^2 - 6,4t_r (R = 0,53);$$

$$t_r = 1527,07 + 0,654t_d - 2,661 \text{ ПГ} + 1,65 \text{ O}_2 (R = 0,97);$$

$$E_{\text{кин}} = -152,315 + 0,0217Q_d + 0,1676t_d - 0,585 \text{ ПГ} + 0,162 \text{ O}_2 (R = 0,47),$$

где  $t_d$  – температура дутья, °С; ПГ – расход природного газа, м<sup>3</sup>/т; O<sub>2</sub> – расход технологического кислорода, м<sup>3</sup>/т.

Адекватность полученных зависимостей подтверждается высокими значениями коэффициентов множественной корреляции, величина которых существенно превышает критическое значение для рассматриваемой выборки –  $R_{\text{крит}} = 0,27$  (при уровне значимости 0,95).

Совместное решение полученных уравнений позволяет определить оптимальное сочетание параметров дутьевого режима, обеспечивающих высокие ТЭП работы доменной печи № 4. В условиях работы доменной печи № 4 за период 2006–2009 гг., оптимальными параметрами дутья, обеспечивающими максимальную производительность при минимальном расходе кокса, можно считать температуру дутья 1140 °С, расход дутья 3400 м<sup>3</sup>/мин, расход природного газа 100–110 м<sup>3</sup>/т и содержание кислорода в дутье 60–70 м<sup>3</sup>/т. При этом достигаются оптимальные уровни теоретической температуры горения на фурмах в пределах 2100–2150 °С и кинетической энергии газовоздушной смеси в интервале 60–80 кДж/с, что позволяет обеспечить производительность до 3500 т/сут при расходе кокса менее 440 кг/т.

#### Литература

1. Тихомиров, Е.Н. Восстановительные газы и кислород в доменной плавке / Е.Н. Тихомиров. – М.: Металлургия, 1982. – 104 с.
2. Логинов, В.И. Повышение эффективности использования кокса в народном хозяйстве / В.И. Логинов, И.М. Глушенко, Е.И. Бехтер. – М.: Металлургия, 1986. – 160 с.
3. Донсков, В.Г. О кинетической энергии дутья и ее влияние на размеры зон горения у фурм доменной печи / В.Г. Донсков, В.П. Лялюк // *Сталь*. – 1961. – № 7. – С. 9–12.
4. Гриненко, И.М. К вопросу расчета числа и диаметра воздушных фурм / И.М. Гриненко, О.В. Митасов, С.Л. Дорошевский // *Сталь*. – 1964. – № 6. – С. 14–18.
5. Товаровский, И.Г. Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса / И.Г. Товаровский. – М.: Металлургия, 1967. – 387 с.
6. Волков, Ю.П. Технолог-доменщик: справ. / Ю.П. Волков, Л.Я. Шнарбер, А.К. Гусаров. – М.: Металлургия, 1986. – 263 с.

**Овчинникова Елена Владимировна**, аспирант, НИТУ «МИСиС», Новотроицкий филиал. 462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8. E-mail: elenka.ov4innikova@narod.ru.

**Шаповалов Алексей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургических технологий, НИТУ «МИСиС», Новотроицкий филиал. 462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8. E-mail: alshapo@yandex.ru.

## **EFFECT OF BLAST PARAMETERS ON THE EFFICIENCY OF BLAST FURNACE AT JSC «URAL STEEL»**

***E.V. Ovchinnikova, A.N. Shapovalov***

The effect of blast parameters on the technical and economic performance of the No. 4 blast furnace at JSC "Ural Steel" is studied. The optimal values of the theoretical combustion temperature in the tuyere hearth and the kinetic energy of the gas flow in the tuyere are determined that provide the best indicators of blast furnace.

*Keywords: blast parameters, indicators of blast furnace, combustion temperature in the tuyere hearth, kinetic energy of the gas flow in the tuyere.*

**Ovchinnikova Elena Vladimirovna**, post-graduate student, Novotroitsk branch, National University of Science and Technology "MISIS". 8 Frunze street, Novotroitsk, Orenburg region, Russia 462359. E-mail: elenka.ov4innikova@narod.ru.

**Shapovalov Aleksey Nikolaevich**, candidate of engineering science, assistant professor of the Metallurgical Technologies Department, Novotroitsk branch, National University of Science and Technology "MISIS". 8 Frunze street, Novotroitsk, Orenburg region, Russia 462359. E-mail: alshapo@yandex.ru.

*Поступила в редакцию 21 февраля 2013 г.*