

УДК 669.162.263.23.004.67

© Семакова В.Б.<sup>1</sup>, Гаврилоглу Д.И.<sup>2</sup>, Антоненко М.И.<sup>3</sup>**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ  
НА ПОКАЗАТЕЛИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ**

*В статье приведены результаты аналитического исследования влияния интенсивности доменной плавки на показатели восстановительных процессов.*

*Ключевые слова:* расход кокса, производительность, интенсивность, степень прямого восстановления, степень использования газа.

*Семакова В.Б., Гаврилоглу Д.И., Антоненко М.И. Аналіз впливу інтенсивності доменної плавки на показники відновних процесів. У статті наведені результати аналітичного дослідження впливу інтенсивності доменної плавки на показники відновних процесів.*

*Ключові слова:* витрата коксу, продуктивність, інтенсивність, ступінь прямого відновлення, ступінь використання газу.

*V.B. Semakova, D.I. Gavryloglu, M.I. Antonenko. Analysis of influence of blast furnace smelting intensity upon indices of reduction processes. The article contains the results of analytical research of influence of blast furnace smelting intensity upon indices of reduction processes.*

*Keywords:* coke consumption, production, intensity, degree of direct reduction, degree of the gas use.

**Постановка проблемы.** Как известно, зависимость удельного расхода кокса  $K$  и производительности печи  $P$  от интенсивности доменной плавки носит экстремальный характер [1-3], при этом значения минимального расхода кокса  $K'_{min}$  и максимальной производительности  $P'_{max}$  в различных условиях неодинаковы. Кроме того,  $K'_{min}$  и  $P'_{max}$  достигаются при разной интенсивности плавки и не соответствуют наивыгоднейшему в экономическом отношении режиму работы печи. В производственных условиях, как правило, определяющим фактором является количество выплавленного чугуна, что вызывает необходимость проанализировать изменение показателей процесса восстановления железа и интенсивности плавки при условии сохранения на постоянном уровне производительности доменной печи.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Интенсивность доменной плавки характеризуется множеством показателей: длительностью пребывания материалов в печи, количеством дутья, газа, железорудных материалов либо кокса, проходящих через печь в единицу времени и отнесенных к единице объема печи или площади сечения её горна [1, 2]. При разных технологических режимах работы печей (применение дутьевых добавок, заменителей кокса, обогащения дутья кислородом и т. д.) возникают затруднения для сравнения хода печей по отдельным показателям интенсивности. Наиболее распространенным показателем является интенсивность по углероду  $I_C$ , т/(м<sup>3</sup>·сут) – отношение количества углерода топлива, израсходованного за сутки, к полезному объему печи. При различном составе дутья более объективно интенсивность характеризуется количеством газов, образующихся у фурм в единицу времени на 1 м<sup>3</sup> полезного объема печи, так как при прочих постоянных условиях плавки её газодинамический режим и характер опускания материалов определяются количеством и скоростью газов. Индекс интенсивности  $I_k$ , удельная производительность печи  $P_v$  и расход кокса  $K$  связаны простым соотношением:  $P_v = I_k / K$ , однако, при этом расход кокса также зависит от интенсивности:  $K = f(I_k)$ . Рост производительности наблюдается, когда с увеличением интенсивности расход кокса остается практически неизменным либо уменьшается. Повышение рудной нагрузки приводит к ухудшению газопроницаемости столба шихтовых материалов, а при дальнейшем уве-

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>3</sup> студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

личении интенсивности – к нарушению газораспределения в печи. Чрезмерное повышение скорости газового потока способствует возникновению канального хода и резкому ухудшению использования тепловой и химической энергии газов [1-5].

**Цель статьи** – проанализировать изменение показателей интенсивности плавки и хода восстановительных процессов в доменной печи на основе математической модели с использованием производственных данных и результатов лабораторных исследований газопроницаемости шихты с чередующимися горизонтальными слоями кокса и агломерата различной высоты.

**Изложение основного материала.** Известно [4, 5], что чрезмерное увеличение расхода дутья в доменные печи приводит к усилению неравномерности газораспределения, что снижает производительность печи и способствует повышению удельного расхода кокса. Увеличение газопроницаемости шихты, например, при использовании отсева мелочи из агломерата перед доменными печами, при применении шихтовых материалов с повышенной механической прочностью и т. д., ослабляет тенденцию роста расхода кокса с повышением расхода дутья в единицу времени.

В доменных печах ММК им. Ильича газопроницаемость столба шихтовых материалов улучшилась вследствие увеличения высоты чередующихся слоев кокса и агломерата. С этой целью был изменен порядок загрузки шихтовых материалов в печь [6]. Обычно загрузка доменных печей осуществляется четырехскиповыми подачами. Так в 2000 г. для загрузки доменной печи № 5 применяли прямые подачи ААКК↓ с рудной нагрузкой 3,334 кг/кг кокса. В 2007 г. использовали систему загрузки с увеличенными порциями компонентов шихты АККК↓ ААА↓ и повышенной до 3,58 кг/кг кокса рудной нагрузкой, в результате интенсивность плавки по суммарному углероду повысилась с 0,851 до 0,994 т/(м<sup>3</sup>·сут) при практически равной интенсивности по дутью, что обусловлено различным содержанием кислорода в дутье (табл.).

Таблица

Показатели работы доменной печи № 5 ММК им. Ильича

Показатель	2000 г.	2007 г.
Суточное производство, т/сут	3336	3995
Удельный расход кокса $K$ , кг/т чугуна	541	520
Интенсивность плавки по коксу $I_k$ , т/(м <sup>3</sup> ·сут)	0,785	0,903
Содержание железа в шихте, %	52,97	52,69
Расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	75	86,5
Интенсивность плавки по дутью, м <sup>3</sup> /(м <sup>3</sup> ·мин)	1,734	1,737
Температура дутья $T_d$ , °С	1016	1053
Содержание кислорода в дутье, %	23,0	25,46
Интенсивность плавки по колошниковому газу $I_s$ , м <sup>3</sup> /(м <sup>3</sup> ·мин)	2,15	2,40
Удельные тепловые потери, %	8,8	9,4
Длительность пребывания материалов в печи, ч	6,50	5,52
Степень использования газа по $FeO$ $\eta_{FeO}$ , %	23,65	24,95
Степень прямого восстановления по М. А. Павлову $r_d$ , %	38,91	35,36
Критерий полноты протекания косвенного восстановления $K_{ri}$ , %	80,82	83,51
Минимальный теоретически возможный расход кокса $K_{min}$ , кг/т чугуна	464,6	453,5
Показатель идеальности плавки	0,860	0,871

Для оценки газопроницаемости зернистой шихты, состоящей из чередующихся горизонтальных слоев кокса и агломерата, проведены исследования на лабораторной установке (рис. 1), основным элементом которой является прозрачный газодинамический цилиндр  $\delta$ . В цилиндрический реактор диаметром 0,22 м и высотой 0,4 м на металлическое сетчатое дно полойно укладывали агломерат фракции 3-5 мм и кокс, предварительно окрашенный известковым молоком, фракции 5-7 мм (рис. 2). Общая высота шихты в цилиндре составляла 150 мм при одинаковой толщине слоев агломерата (А) и кокса (К), что соответствовало постоянной рудной нагрузке 3,0 кг/кг кокса. Изменение перепада статического давления в шихте, состоящей из двух (АК), четырех (2×АК) и восьми (4×АК) слоев, показано на рис. 3, из которого оче-

видно, что худшей газопроницаемостью обладает шихта, составленная из слоев с меньшей высотой (кривая 1), т. е. с наибольшим количеством межслойных зон.

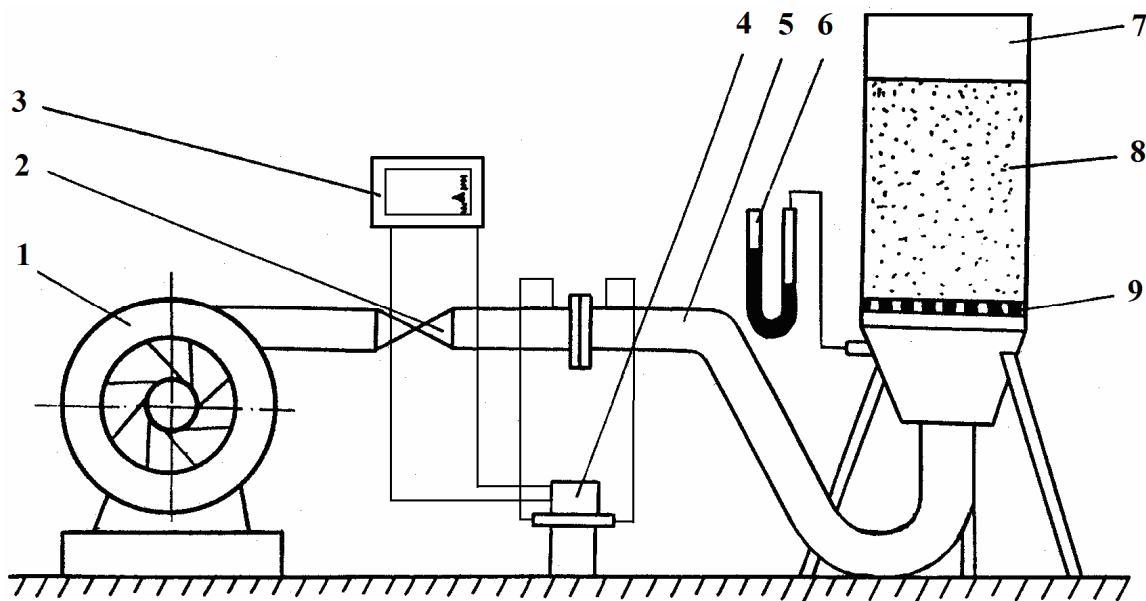


Рис. 1 – Лабораторная установка для определения перепада давления газа в слое зернистого материала: 1 – вентилятор; 2 – задвижка; 3 – расходомер; 4 – дифманометр; 5 – соединительный шланг для подвода дутья; 6 – U-образный манометр; 7 – прозрачный газодинамический цилиндр; 8 – зернистый материал; 9 – металлическая сетка

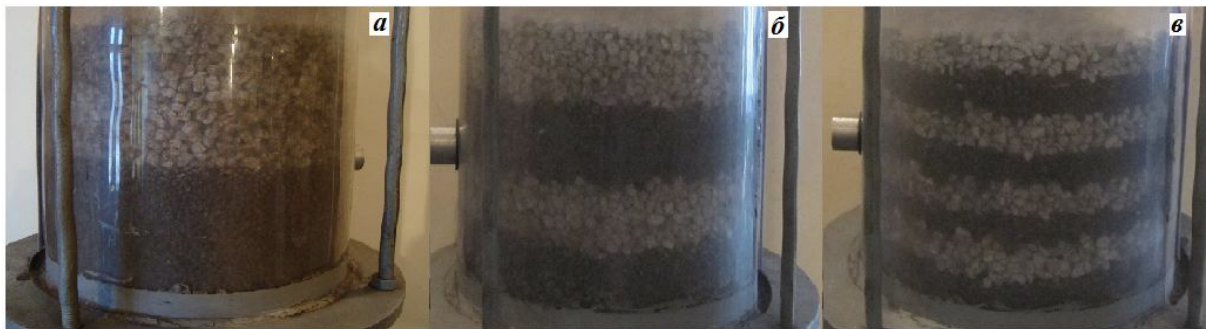


Рис. 2 – Расположение в газодинамическом цилиндре чередующихся слоев агломерата (темный слой) и кокса (светлый слой) различной высоты: а – 75 мм (АК); б – 37,5 мм (2×АК); в – 18,75 мм (4×АК) (пояснения в тексте)

Известно, что на границе двух зернистых слоев возникает межслоевой эффект [7], характеризующийся местными сопротивлениями. С увеличением высоты слоев агломерата и кокса существенно повышается газопроницаемость столба шихты вследствие снижения влияния суммарного межслоевого эффекта, оказываемого меньшим количеством межслойных зон с низкой газопроницаемостью. При равном расходе воздуха  $1,46 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  увеличение высоты слоев компонентов с 18,75 (рис. 3, кривая 1) до 37,5 мм (кривая 2), способствовало снижению перепада статического давления на 12 %. Дальнейшее повышение высоты слоев кокса и агломерата до 75 мм показало наибольшее снижение перепада давлений у двухслойной шихты на 35 % (кривая 3). Улучшение газопроницаемости столба шихтовых материалов с ростом высоты слоев его компонентов также наблюдается при повышенной рудной нагрузке [8]. В производственных условиях повышение высоты слоев отдельных компонентов шихты достигается раздельной загрузкой доменных печей увеличенными порциями кокса и агломерата.

Применение отдельных утяжеленных подач в доменной печи ММК им. Ильича способствовало улучшению газопроницаемости столба шихтовых материалов и более равномерному их распределению по сечению печи [6], что обеспечило более эффективную восстановительную работу газового потока, подтверждающуюся повышением его степени использования  $\eta_{FeO}$  на 1,3 % при снижении резерва косвенного восстановления ( $R_z=100 - K_{ri}$ ) на 2,69 %.

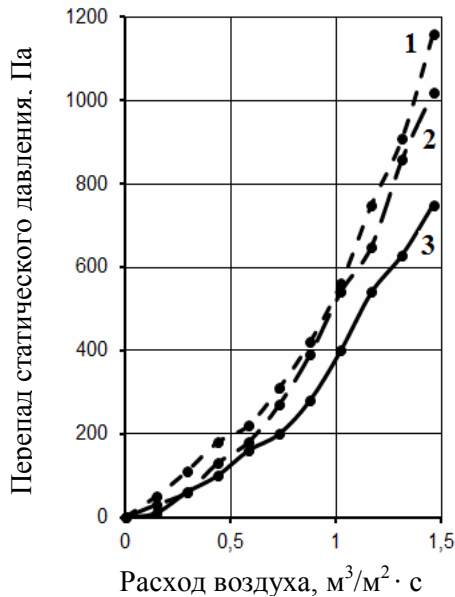


Рис. 3 – Изменение перепада статического давления с повышением расхода воздуха в столбе сыпучей шихты постоянной высоты при разном количестве слоев кокса и агломерата: 1 – 4×АК; 2 – 2×АК; 3 – АК

характеризуемая «показателем идеальности»  $\zeta=K_{min}/K$  [9], при применении утяжеленных подач увеличилась с 0,860 до 0,871.

При помощи математической модели спрогнозировано изменение показателей интенсивности плавки (рис. 4) в технологических условиях 2000 г. (пунктирные линии) и 2007 г. (сплошные линии) по мере улучшения использования восстановительного потенциала печных газов при постоянной производительности печи. При повышении степени использования газа по FeO непрерывно снижаются удельный расход кокса  $K$  (кривая 1), степень прямого восстановления железа по М. А. Павлову  $r_d$  (кривая 2) и выход колошникового газа  $V_z$  (кривая 3), которые достигают минимальных теоретически возможных значений 453,5 кг/т чугуна, 22,5 %, 1797 м³/т чугуна соответственно для условий работы в 2007 г. (464,6 кг/т чугуна, 24,4 %, 1910 м³/т чугуна для 2000 г.) при достижении равновесного состава печного газа и максимальной теоретически возможной степени использования газа  $\eta_{wmax}=33,45\%$  для 2007 г. и 33,27 % для 2000 г. (рис. 4, а). Снижение удельного расхода кокса при соответствующем росте рудной нагрузки (кривая 1) до 4,1 кг/кг кокса для режима работы печи в 2007 г. (3,93 кг/кг для 2000 г.) сопровождается сокращением интенсивности плавки по колошниковому газу до 2,17 м³/(м³·мин) (кривая 2), уменьшением безразмерного расхода газа-восстановителя  $V_s$  до 2,317 моль/моль (кривая 3) и интенсивности плавки по коксу  $I_k$  (кривая 4) до 0,787 т/(м³·сут) (для условий работы в 2000 г.: 1,92 м³/(м³·мин), 2,272 моль/моль, 0,674 т/(м³·сут) соответственно) (рис. 4, б). Область значений, соответствующая интенсивности плавки по коксу  $I_k$  более 1,1 т/(м³·сут), представляет лишь теоретический интерес, так как при дальнейшем повышении  $I_k$  возрастает вероятность возникновения канального хода доменной печи, который определяет предельную интенсивность плавки [2]. Таким образом, дальнейшее улучшение контакта газа-восстановителя с железорудными материалами за счет совершенствования распределения материалов и газов по сечению колошника, прочностных и физико-химических характеристик

шихты без повышения производительности печи будет способствовать снижению интенсивности плавки и степени прямого восстановления железа, сокращению удельного расхода кокса при повышении степени использования газа, рудной нагрузки и времени пребывания материалов в печи. Длительность контакта газа-восстановителя с железорудными материалами [10] при раздельной загрузке шихтовых материалов увеличилась с 0,63 до 0,73 с [8].

Согласно многочисленным исследованиям и закономерности, принципиально установленной А.Н. Раммом [2], при постоянных

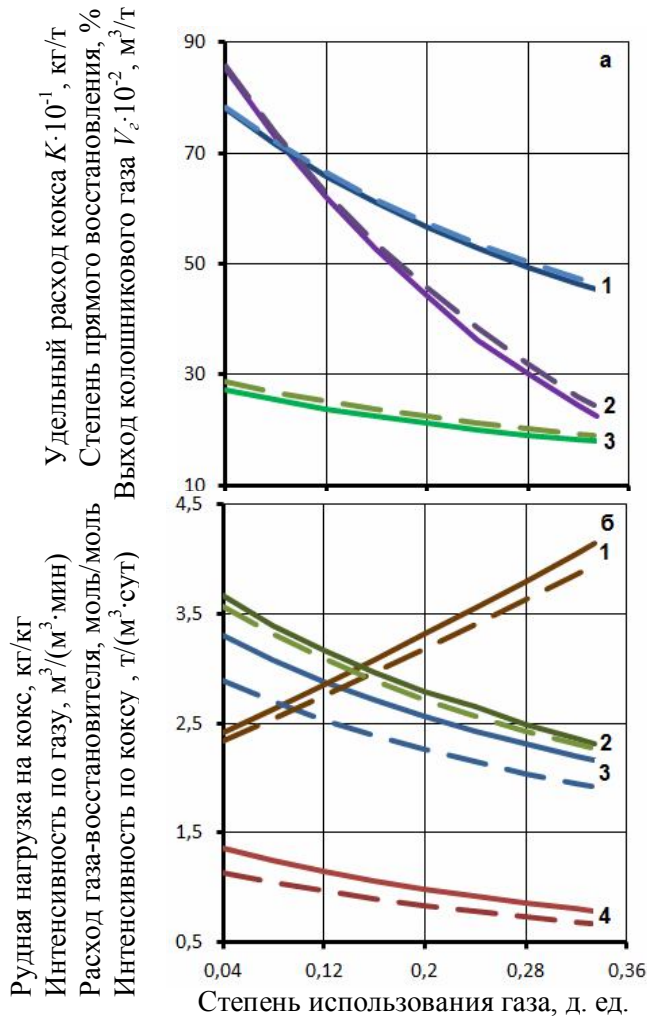


Рис. 4 – Изменение показателей работы доменной печи при улучшении восстановительной работы газового потока (пояснения в тексте)

Удельный расход кокса изменяется по кривой с минимумом (рис. 5, а, кривая 1), который расположен в области относительно слабой форсировки печи и для технологических условий 2007 г. составлял  $K'_{min}=492$  кг/т чугуна при интенсивности по дутью  $I_0=1,21$  м<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>·мин). Повышение форсировки печи дутьем способствует росту степени прямого восстановления  $r_d$  (кривая 2); характер изменения безразмерного расхода газа-восстановителя  $V_s$  подобен кривой изменения расхода кокса (кривая 3) с минимальным значением 2,48 моль/моль; при росте интенсивности до 1,05 м<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>·мин) степень использования газа по FeO  $\eta_\phi$  была практически постоянной и максимальной, так как газ достигал равновесного состава, а затем снижалась (кривая 4). Форсировка печи дутьем в рассмотренном интервале интенсивности сопровождалась непрерывным повышением удельной производительности печи (рис. 5, б, кривая 1). С повышением интенсивности плавки по дутью непрерывно снижаются удельные тепловые потери (кривая 2) и длительность пребывания шихты в печи (кривая 3), интенсивность по газу повышается (кривая 4). Об-

стоянных условиях повышение интенсивности плавки  $I_k$  путем увеличения расхода дутья в единицу времени вызывает изменение удельного расхода кокса по кривой с минимумом, а производительности печи по кривой с максимумом. Считается, что наилучшее газораспределение и использование тепловой и восстановительной энергии газового потока происходит при интенсивности, близкой к области оптимальных значений  $K'_{min}$  и  $P'_{max}$ . В зонах низкой и высокой форсировки хода печи наблюдается неравномерное распределение газового потока. При помощи математической модели спрогнозировано изменение показателей работы доменной печи № 5 ММК им. Ильича при увеличении интенсивности доменной плавки. Степень восстановления железорудных материалов в «сухой» зоне печи  $r$  рассчитывалась на основе кинетических характеристик железорудной шихты согласно закону действующих масс:  $dr/d\tau=k_v(1-r)$  [11], где  $k_v$  – константа скорости реакции, которая характеризует среднюю скорость восстановления монооксида железа. Степень использования газа определялась исходя из условия равенства потребности в коксе-источнике тепла и коксе-восстановителе и предварительно рассчитанной степени косвенного восстановления. Потери тепла для печи в единицу времени принимались постоянными [12].

Изменение показателей работы доменной печи при повышении интенсивности плавки приведено на рисунке 5.

ласть высокой интенсивности плавки, в которой ухудшается газораспределение и нарушается сход шихтовых материалов, что способствует снижению производительности печи, не рассматривалась и требует дальнейших исследований с учетом газодинамического режима доменной плавки.

**Выводы**

1. На основе математической модели проанализировано изменение показателей восстановительных процессов и интенсивности доменной плавки при неизменных технологических условиях. Улучшение контакта газа-восстановителя с железорудными материалами за счет совершенствования распределения материалов и газов по сечению печи, прочностных и физико-химических характеристик шихты при сохранении производительности печи на постоянном уровне способствует снижению интенсивности плавки и степени прямого восстановления железа, сокращению удельного расхода кокса при повышении степени использования газа, рудной нагрузки и времени пребывания материалов в печи.
2. В области пониженной интенсивности доменной плавки возможно достижение высокой степени восстановления железа косвенным путем при достижении газом-восстановителем равновесного состава в зоне умеренных температур. При повышении интенсивности плавки степень использования восстановительной способности газового потока снижается, и в большей мере получают развитие реакции прямого восстановления железа.
3. Дальнейшие исследования изменения показателей восстановительных процессов в области высокой интенсивности необходимо проводить с учетом газодинамического режима доменной плавки.

**Список использованных источников:**

1. Ефименко Г.Г. *Металлургия чугуна* / Г.Г. Ефименко, А.А. Гиммельфарб, В.Е. Левченко. – М.: Вища школа, 1981. – 496 с.
2. Рамм А.Н. *Современный доменный процесс* / А.Н. Рамм. – М.: *Металлургия*, 1980. – 304 с.
3. Товаровский И.Г. *Анализ показателей и процессов доменной плавки* / И.Г. Товаровский,

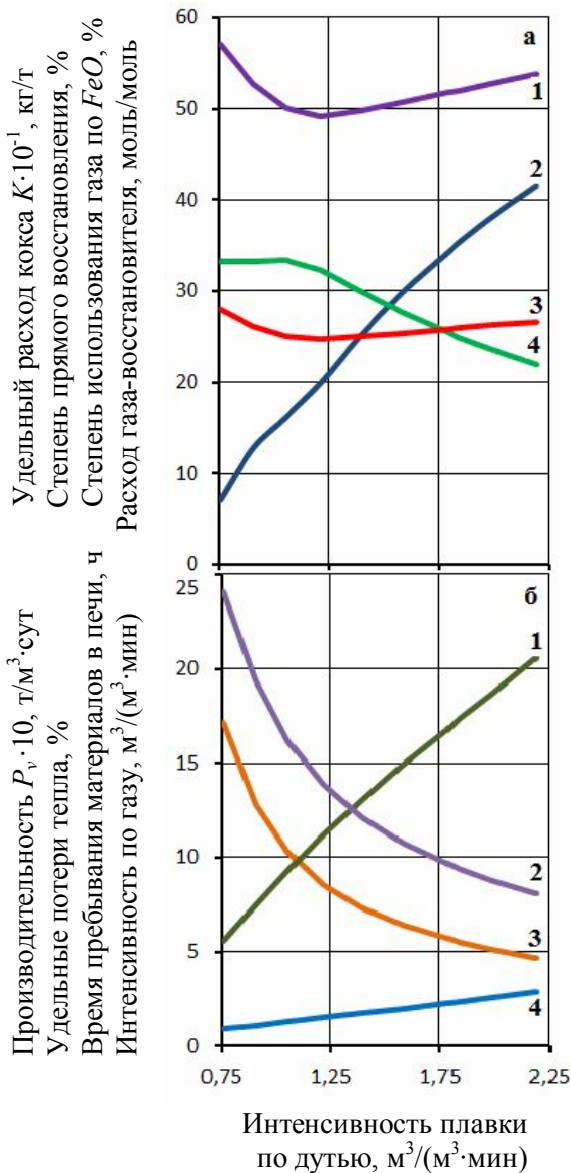


Рис. 5 – Изменение показателей работы доменной печи при повышении интенсивности плавки (пояснения в тексте)

4. Товаровский И.Г. *О пределах форсировки доменной плавки* / И.Г. Товаровский [и др.] // *Металлург.* – 1964. – № 5. – С. 5-9.
5. Товаровский И.Г. *Интенсивность хода и удельный расход кокса в современных и перспективных условиях доменной плавки* / И.Г. Товаровский, В.И. Бондаренко // *Сталь.* – 1978. – № 3. – С. 203-206.
6. *Управление радиальным распределением шихты и газов в доменных печах ОАО "ММК им. Ильича" при раздельной загрузке увеличенных масс кокса и агломерата* /

- А.А. Томаш [и др.] // *Металлургические процессы и оборудование.* – 2005. – № 2. – С. 35-38.
7. К вопросу о влиянии межслойного эффекта на газопроницаемость шихт / В.О. Вейшедель [и др.] // *Известия ВУЗов. Черная металлургия* – 1984. – № 7. – С. 27-32.
  8. Семакова В.Б. Анализ экономичности восстановительных процессов в доменных печах / В.Б. Семакова, В.В. Семаков, Д.И. Гаврилоглу // *Сталь.* – 2012. – № 4. – С. 2-5.
  9. Андронов В.П. Минимально возможный расход кокса и влияние на него различных факторов доменной плавки / В.П. Андронов. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГТУ, 2001. – 142 с.
  10. Повышение эффективности использования природного газа в доменной плавке / С.Л. Ярошевский [и др.]. – Донецк: Новый мир, 2002. – 46 с.
  11. Лисиенко В.Г. Теплофизика металлургических процессов / В.Г. Лисиенко, В.И. Лобанов, Б.И. Китаев. – М.: Металлургия, 1982. – 240 с.
  12. *Металлургия чугуна* / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев [и др.] // Под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: Академкнига, 2004. – 774 с.

**Bibliography:**

1. Efimenko G.G. Metallurgy of cast iron / G.G. Efimenko, A.A. Gimmelfarb, V.E. Levchenko. – Moscow: High school, 1981. – 496 p. (Rus.)
2. Ramm A.N. Contemporary blast furnace process / A.N. Ramm. – Moscow: Metallurgy, 1980. – 304 p. (Rus.)
3. Tovarovskiy I.G. Analysis of indexes and processes of blast furnace smelting / I.G. Tovarovskiy, V.V. Severnyuk, V.P. Lyalyuk. – Dnepropetrovsk: Porogy, 2000. – 420 p. (Rus.)
4. Tovarovskiy I.G. The limits of forcing blast furnace / I.G. Tovarovskiy [et al] // *Metallurg.* – 1964. – V. 5. – P. 5-9. (Rus.)
5. Tovarovskiy I.G. The intensity of the course and the specific consumption of coke in the current and future conditions of blast furnace / I.G. Tovarovskiy, V.I. Bondarenko // *Steel.* – 1978. – V. 3. – P. 203-206. (Rus.)
6. Control the radial distribution of the charge and gas in blast furnaces of «Ilyich Iron and Steel Works» by increasing the mass of the separate loading of coke and sinter/ A.A. Tomash [et al] // *Metallurgical processes and equipment.* – 2005. – V. 2. – P. 35-38. (Rus.)
7. On the influence of interplay effect on gas permeability mix materials / V.O. Veyschedel [et al] // *Izv. Vuzov. Cher. Metallurgia.* – 1984. – V. 7. – P. 27-32. (Rus.)
8. Semakova V.B. Economic analysis of reduction processes in blast furnaces / V.B. Semakova, V.V. Semakov, D.I. Gavriloglu // *Steel.* – 2012. – V. 4. – P. 2-5. (Rus.)
9. Andronov V.P. The minimum possible consumption of coke and influence of various factors of blast furnace / V.P. Andronov – St. Petersburg: Publishing StPSTU, 2001. – 142 p. (Rus.)
10. Improvement in the use of natural gas in blast furnace / S.L. Yaroshevskiy [et al]. – Donetsk: The New world, 2002. – 46 p. (Rus.)
11. Lisienko V.G. Heat physics of metallurgical process / V.G. Lisienko, V.I. Lobanov, B.I. Kitaev. – Moscow: Metallurgy, 1982. – 240 p. (Rus.)
12. *Metallurgy of cast iron* / E.F. Vegman, B.N. Gerebin, A.N. Pokhvisnev [et al] // Edit. Yu.S. Yusfin. – Moscow: Academbook, 2004. – 774 p. (Rus.)

Рецензент: В.П. Тарасов  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.04.2013