

## Сопоставительный анализ показателей доменной плавки с применением в шихте окатышей различной основности

На основе математического моделирования проанализировано изменение показателей доменной плавки при повышении основности окатышей в шихте и разных степенях использования восстановительной энергии газового потока. Рассмотрена возможность возникновения канального хода доменной печи в результате формирования вертикальных межслоевых зон между агломератом и окатышами.

**Ключевые слова:** агломерат, окатыши, основность, расход кокса, газопроницаемость, межслоевой эффект, интенсивность плавки

Качество железорудных материалов является одним из основных факторов, определяющих технико-экономические показатели доменной плавки. Современные доменные печи работают на подготовленной шихте, представленной окучкованными материалами – агломератом и окатышами, которые имеют свои преимущества и недостатки. Основными преимуществами окатышей является высокое содержание железа и прочность в холодном состоянии. Агломерат, характеризующийся меньшей окисленностью, более низкой прочностью при транспортировке, перегрузках и большим количеством связки, обладает более высокой горячей прочностью, что приводит к выравниванию содержания мелочи в шахте печи при проплавке агломерата и окатышей, склонных к растрескиванию при восстановлении [1]. Сравнительные результаты промышленных плавков на различных видах окучкованного сырья неоднозначны [2] и показывают менее эффективное использование повышенного содержания железа в окатышах вследствие образования пылеватых фракций при их восстановлении, а также необходимости применения сырого известняка для компенсации низкой основности [3]. Переход доменных печей на работу с повышенной долей окатышей в шихте сопровождается увеличением расхода сырого известняка до 150-200 кг / т чугуна, что существенно ухудшает показатели доменной плавки. При высоком расходе флюса относительно эффективна замена сырого известняка известью либо конвертерным шлаком. Недостатком применения извести в доменной плавке является повышенный вынос мелких фракций с колошниковой пылью. Использование в качестве флюса конвертерного шлака сопровождается увеличением выхода шлака на 33-48 кг / т чугуна и ограничивается наличием в нём вредных примесей.

Замена офлюсованного агломерата неофлюсованными окатышами и совместная проплавка неофлюсованных окатышей с высокоосновным агломератом оказались неэффективными [2, 4], что также объясняется расширением зоны когезии при использовании в шихте нескольких видов железорудного сырья с различной размягчаемостью [5].

Анализ результатов промышленных опытов [2] однозначно показал необходимость офлюсования окучкованных материалов для полного вывода сырого флюса из доменной шихты, при этом степени офлюсования агломерата и окатышей должны быть близкими.

С целью проведения сравнительного анализа работы доменной печи на шихте, состоящей из 30 % агломерата и 70 % окатышей при изменении основности последних, выполнено математическое моделирование показателей плавки, результаты которого представлены на рис. 1. Базовый химический состав железорудных материалов приведён в таблице.

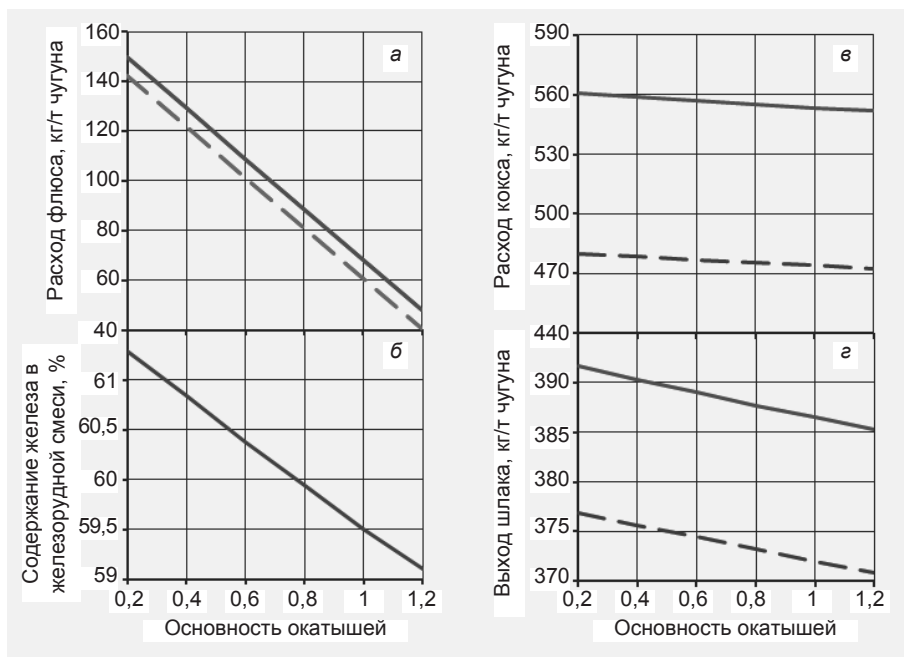


Рис. 1. Показатели доменной плавки при повышении основности окатышей (по-яснения в тексте)

## Химический состав окатышей и агломерата

Материал	Fe	FeO	CaO	B = CaO / SiO <sub>2</sub>
Окатыши	63,56	2,02	3,00	0,60
Агломерат	52,96	13,30	12,30	1,25

Моделирование показателей плавки проводилось при постоянных дутьевых параметрах (содержание кислорода в дутье 24,29 %, интенсивность по дутью 1,52 м<sup>3</sup> / (м<sup>3</sup> · мин), расход природного газа 102,8 м<sup>3</sup> / т чугуна), применявшихся в практике ведения доменной печи МК «Азовсталь», работавшей с удельной производительностью 1,438 т / (м<sup>3</sup> · сут) на шлаке основностью 1,185. Потери при прокаливании флюса (сырого и частично обожжённого известняка) составляли 34,18 %. Расчёт проводился при постоянной производительности печи и степени использования восстановительной способности газа по реакции восстановления FeO ( $\eta_{FeO}$ ), равной 20 (рис. 1, а, в, г, сплошные линии) и 28 % (пунктирные линии), что соответствует реальным пределам изменения данного показателя в условиях МК «Азовсталь» [6].

Содержание железа в железорудной шихте изменялось от 61,3 до 59,1 % при повышении основности окатышей от 0,2 до 1,2 (рис. 1, б) и соответствующем увеличении основности смеси агломерата и окатышей от 0,515 до 1,215. В рассмотренном интервале основности окатышей снижение расхода флюса составило 101,5 и 101,3, кокса – 8,8 и 7,2, выхода шлака – 6,4 и 6,1 кг / т чугуна при  $\eta_{FeO} = 20$  и 28 % (рис. 1, а, в, г) соответственно. Степень прямого восстановления по М. А. Павлову  $r_d$  характеризовалась незначительным ростом на 1,16-1,44 % (абс.).

Совместное применение офлюсованных окатышей и агломерата основностью 1,25 не обеспечило в рассмотренных технологических условиях полного вывода флюса из шихты, который возможен при введении в шихту наряду с основными окатышами (B = 1,2) высокоосновного агломерата (B = 1,8). Однако следует учитывать, что технологически невозможно производить окатыши с необходимой для доменной плавки основностью (по CaO / SiO<sub>2</sub> выше 0,8) при использовании железорудных концентратов, содержащих более 5,0 % кремнезема [7].

Зарубежный опыт работы доменных печей с долей окатышей в шихте 86,5-100 %, содержащих 66-69 % железа, и расходом известняка 76-164 кг / т чугуна показал низкий выход шлака 143-306 кг / т чугуна с повышенным до 12-19 % содержанием MgO и высокой основностью (CaO + MgO) / SiO<sub>2</sub> до 1,27-1,45. Вследствие низкого выхода шлака в чугуне содержалось повышенное до 0,035-0,080 % количество серы и пониженное – кремния [8].

Результаты математического моделирования показателей доменной плавки, проведённого при соблюдении условия постоянства химического состава чугуна, %: 0,788 Si, 0,781 Mn, 0,021 S, 0,035 P, показали значительное влияние на расход кокса степени использования газа  $\eta_{FeO}$ . Повышение  $\eta_{FeO}$  с 20 до 28 % при неизменных шихтовых и дутьевых условиях способствовало снижению расхода кокса практически на 80, флюса – на 8 и выхода шлака – на 14 кг / т чугуна.

Степень использования газа функционально связана со степенью косвенного восстановления  $r_i = (1 - r_d)$  и зависит от тех же факторов, что и  $r_i$ : количества и состава горнового газа, распределения температуры по высоте печи, времени пребывания шихты при различных температурах и её физико-химических свойств, распределения материалов по сечению печи [9]. Применение в доменной шихте окатышей, характеризующихся большей насыпной массой и меньшим коэффициентом внутреннего трения по сравнению с агломератом, вносит изменения в структуру столба шихтовых материалов в печи, которая обуславливает его газопроницаемость как в целом, так и распределение газа по радиальным зонам колошника, и, следовательно, интенсивность плавки.

Статистический анализ производственных данных показал тесную связь между долей окатышей в железорудной части шихты O (%) и интенсивностью доменной плавки по газу в условиях МК «Азовсталь» (коэффициент парной линейной корреляции  $r = -0,76$ ). Повышение доли окатышей в шихте с 48 до 84 % сопровождалось снижением интенсивности плавки по газу  $I_r$  (рис. 2) и описывалось уравнением, м<sup>3</sup> / (м<sup>3</sup> · мин):

$$I_r = 0,0004 O^2 - 0,0638 O + 4,657. \quad (1)$$

Теоретическое корреляционное отношение составило  $\eta_{теор} = 0,9$ , что свидетельствует о тесной связи между интенсивностью плавки и содержанием окатышей в шихте.

Для изучения влияния доли окатышей на газопроницаемость железорудной шихты проведены лабораторные исследования. Одним из методов определения сопротивления материалов движению газов является измерение перепада статического давления газа  $\Delta P$  в слое сыпучего материала, который укладывается в газодинамический цилиндр и продувается воздухом с последовательным увеличением его расхода. Известно, что наименьшим сопротивлением прохождению газов характеризуется кокс, а перепад

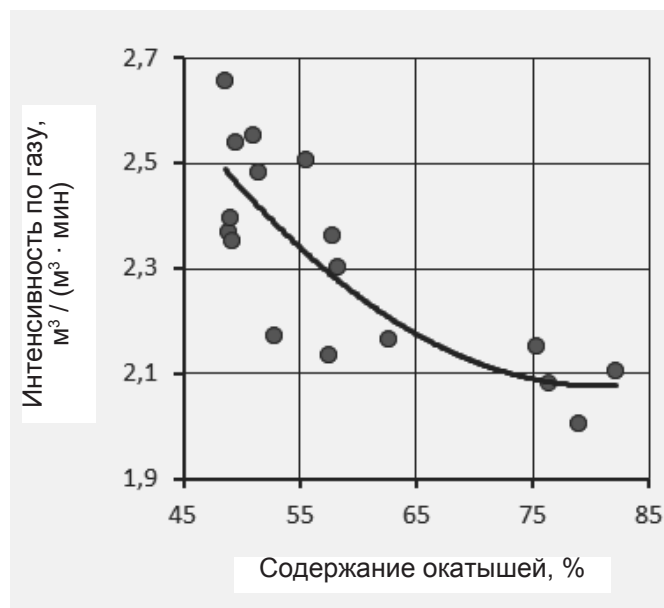


Рис. 2. Интенсивность плавки по газу при повышении доли окатышей в шихте в условиях МК «Азовсталь»

давления газа в слое железорудных компонентов доменной шихты возрастает с повышением в них доли мелочи. Распределение газа в столбе шихтовых материалов происходит прямо пропорционально газопроницаемости его отдельных объёмов [10], поэтому в промежуточной зоне доменных печей, характеризующейся высокой рудной нагрузкой и большим количеством мелких фракций, наблюдается наименьшая скорость газового потока.

Исследования [11] перепада статического давления газа в слое промышленных проб железорудных материалов показали худшую газопроницаемость агломерата, содержащего повышенное количество мелких фракций, по сравнению с окатышами. При этом увеличение доли окатышей до 30 % в смеси с агломератом способствовало повышению газодинамического сопротивления слоя, а дальнейший рост содержания окатышей в смеси приводил к его снижению.

Лабораторные исследования в газодинамическом цилиндре диаметром 0,22 м перепада статического давления газа (рис. 3) в слоях агломерата А (кривая 1) и окатышей О (кривая 5) фракции 3-4 мм равной высоты, составляющей 150 мм, подтвердили лучшую газопроницаемость агломерата [9] при отсутствии в материалах мелкой фракции. При расходе воздуха  $180 \text{ м}^3 / \text{ч}$  перепад статического давления газа в слое окатышей выше, чем в аналогичном слое агломерата, на 25 %. Газопроницаемость шихты при послонной укладке агломерата и кокса также выше в сравнении с послонной укладкой окатышей и кокса [12].

Лабораторные исследования перепада статического давления газа в бинарном слое доменной шихты, представленном агломератом и окатышами, с вертикальной границей раздела при различном соотношении компонентов (рис. 4, вид сверху) показали постепенное снижение её газопроницаемости с ростом содержания окатышей (см. рис. 3) до 25 (кривая 2),

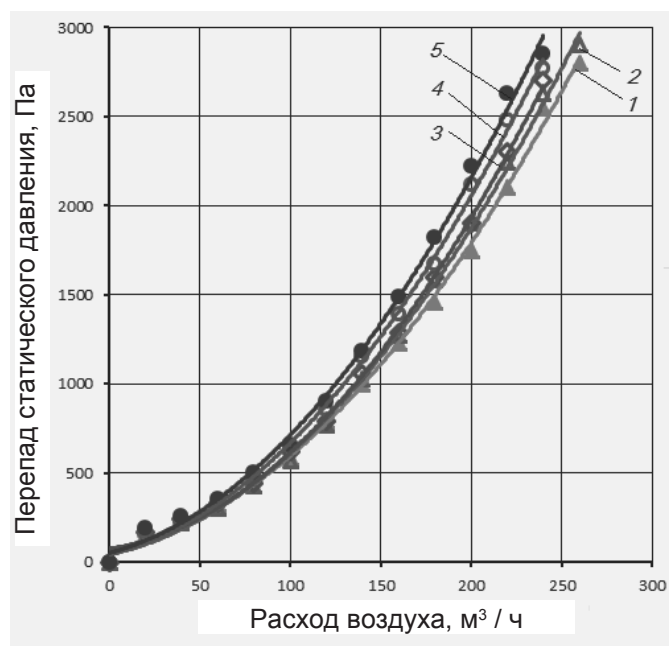


Рис. 3. Газопроницаемость железорудной части доменной шихты при разном содержании окатышей (пояснения в тексте)

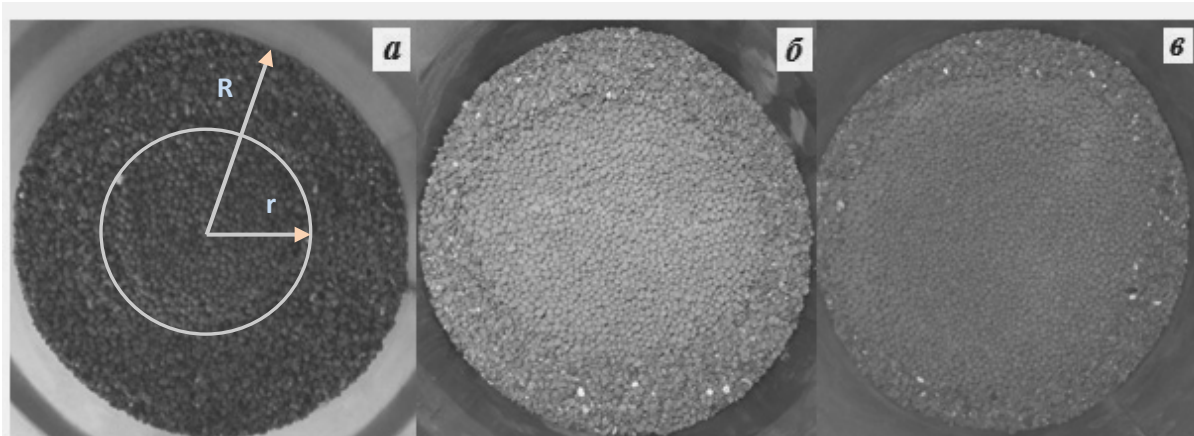
50 (кривая 3) и 75 % (кривая 4) при равном расходе воздуха. Прирост газодинамического сопротивления в бинарных слоях железорудных материалов (кривые 2-4) относительно разности перепадов давлений в монослоях агломерата (кривая 1), располагающегося на периферии, и окатышей (кривая 5), располагающихся в центре газодинамического цилиндра, был практически пропорционален доле последних в слое.

В производственных условиях (см. рис. 2) повышение доли окатышей в шихте сопровождается замедлением снижения интенсивности плавки по газу, обусловленном, в том числе, частичным перемешиванием окатышей с коксом. Согласно исследованиям [13] газопроницаемость смесей железорудных материалов с коксом выше исходной газопроницаемости агломерата и окатышей, поэтому применение системы загрузки АККО↓, способствующей смешиванию окатышей и кокса в слое подачи, позволяет достичь наиболее высокой и равномерной по радиусу газопроницаемости шихты при доле окатышей 40-50 %. При загрузке в доменные печи более подвижные окатыши, имеющие меньший в сравнении с агломератом угол естественного откоса, смещаются в центральную зону печи [11, 14]. Следовательно, на доменных печах, работающих с осевой коксовой отдушиной, окатыши из промежуточной зоны частично перетекают в осевую зону, перемешиваясь с коксом. При этом газопроницаемость осевой отдушины несколько снижается, однако остаётся более газопроницаемой в сравнении с другими радиальными зонами колошника. Таким образом, при относительно низких расходах окатышей в доменной шихте значительного роста газодинамического сопротивления столба материалов в печи не наблюдается.

В лабораторных условиях при доле окатышей в шихте, составляющей 25 %, прирост газодинамического сопротивления в бинарном слое железорудных материалов (см. рис. 3, кривая 2) относительно разности перепадов давлений в монослоях агломерата и окатышей (кривые 1 и 5) несколько превышал (на 1-3 %) долю окатышей в слое, что обусловлено максимальной (в данных условиях эксперимента) площадью соприкосновения двух вертикальных слоёв зернистых материалов, приходящейся на 1 % содержания окатышей, расположенных в центре реактора, которая составила 2 % от площади боковой поверхности рабочего пространства реактора  $S_6$ , занятого шихтой. При доле окатышей в шихте, составляющей 75 %, площадь соприкосновения вертикальных слоёв железорудных материалов снижается до 1,15 % от  $S_6$ , а прирост газодинамического сопротивления в зернистом слое (кривая 4) был несколько ниже (на 1-4 %) содержания окатышей в шихте.

Таким образом, влияние межслоевого эффекта на вертикальной границе соприкосновения материалов проявлялось пропорционально удельной площади межслойной поверхности  $S_{mc} = S_{\text{ц}} / V_{\text{ц}} = 2 / r$ , приходящейся на 1 % содержания окатышей, расположенных в центре реактора в виде цилиндра объёмом  $V_{\text{ц}}$  с радиусом  $r$  и площадью боковой поверхности цилиндрического слоя окатышей  $S_{\text{ц}}$  (рис. 4). При рассмотренном расположении компонентов шихты рост



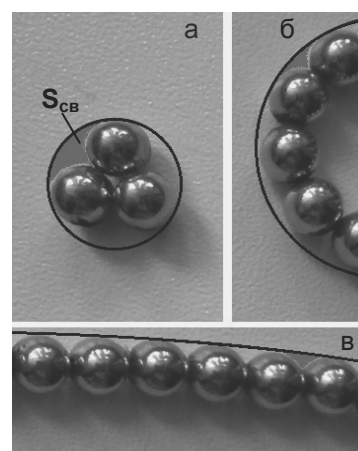


**Рис. 4.** Расположение железорудных материалов в газодинамическом цилиндре вертикальными слоями с размещением у стен агломерата и в центральной зоне окатышей в количестве, %: 25 (а); 50 (б); 75 (в) (пояснения в тексте)

доли окатышей в шихте сопровождается соответствующим снижением  $S_{MC}$  с  $4 / R$  при 25 % окатышей в шихте до  $2,83 / R$  и  $2,31 / R$  при 50 и 75 % – соответственно, где  $R$  – радиус рабочего пространства газодинамического цилиндра.

Кроме того, боковая поверхность цилиндрического слоя окатышей с ростом его радиуса  $r$  имеет различный рельеф, характеризующийся объёмом пустот либо в поперечном сечении (рис. 5) свободной площадью  $S_{CB}$ , приходящейся на один окатыш, между поверхностью собственно окатышей и окружностью, описывающей их, которая является горизонтальной проекцией боковой поверхности цилиндра. Для слоя (рис. 5, а), представленного в поперечном сечении тремя окатышами, свободная площадь  $S_{CB}$  составляет  $0,53 S_{OK}$ , где  $S_{OK}$  – площадь сечения одного окатыша, и может заполняться частицами агломерата, имеющими неправильную форму, что приводит к снижению порозности межслоевой зоны. При росте доли окатышей в шихте радиус, образованного ими цилиндра увеличивается (рис. 5, б), а свободная площадь  $S_{CB}$  сокращается. Так, свободная площадь между слоем окатышей, расположенных в одной плоскости (рис. 5, в), и касательной к ним прямой составляет  $0,14 S_{OK}$ . Сокращение  $S_{CB}$  при повышении доли окатышей в шихте препятствует заполнению пустот на поверхности раздела компонентов агломератом, что способствует некоторому увеличению порозности межслоевой зоны. Следовательно, с ростом содержания окатышей в шихте при рассмотренной укладке материалов влияние межслоеного эффекта ослабевает, а прирост газодинамического сопротивления замедляется.

Таким образом, вертикальная межслоевая зона может характеризоваться как повышенным сопротивлением проходу газов, так и пониженным, что в последнем случае может способствовать образова-



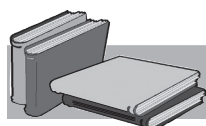
**Рис. 5.** Внешний слой окатышей (пояснения в тексте)

нию канального хода газов в печи, и, как следствие, снижению степени использования тепловой и восстановительной энергий газового потока.

## Выводы

Формирование рациональной структуры столба шихты в доменной печи, обеспечивающей повышение степени использования газового потока на 1 % (абс.) в равных шихтовых и дутьевых условиях, по результатам математического моделирования позволяет снизить расход кокса приблизительно на 1,8 %, что сопоставимо с экономией кокса от повышения основности железорудной шихты с 0,515 до 1,215.

При ведении доменной плавки необходимо не допускать в периферийной и промежуточной радиальных зонах возможность образования вертикальных и близких к ним наклонных поверхностей раздела агломерата и окатышей, способствующих возникновению канального хода печи.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Металлургия чугуна / Е. Ф. Вегман, Б. Н. Жеребин, А. Н. Похвиснев и др. // Под редакцией Ю. С. Юсфина. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.

2. *Товаровский И. Г.* Анализ показателей и процессов доменной плавки / И. Г. Товаровский, В. В. Севернюк, В. П. Лялюк. – Днепропетровск: Пороги, 2000. – 420 с.
3. *Тарасов В. П.* Теория и технология доменной плавки / В. П. Тарасов, П. В. Тарасов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 384 с.
4. Опытные плавки с изменением в доменной шихте ММК доли нефлюсованных окатышей ССГОК от 0 до 100 % / З. И. Некрасов и др. // *Сталь*. – 1978. – № 1. – С. 11-18.
5. *Томаш А. А.* Изменение порозности многокомпонентной доменной шихты при размягчении / А. А. Томаш и др. // *Вестник Приазовского государственного технического университета. Сер.: Технические науки: Сб. науч. трудов*. – Мариуполь: ПГТУ, 1999. – Вып. 8. – С. 9-14.
6. *Русских В. П.* Анализ показателей восстановимости железорудной шихты доменной плавки / В. П. Русских, В. В. Семаков // *Бюллетень «Чёрная металлургия»*. – 2014. – № 11. – С. 19-24.
7. Разработка технологических параметров получения офлюсованного окускованного железорудного материала для доменной плавки, сочетающего лучшие металлургические характеристики агломерата и окатышей / Н. И. Ступник, В. П. Лялюк, Ф. М. Журавлев и др. // *Вісник Криворізького національного університету*, 2014. – Вип. 36. – С. 3-9.
8. Работа доменных печей с высокой долей окатышей в шихте / А. А. Минаев, В. И. Бирючев, С. Л. Ярошевский и др. // *Металлург*. – 1998. – № 10. – С. 23-27.
9. *Товаровский И. Г.* Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса / И. Г. Товаровский. – М.: Металлургия, 1987. – 192 с.
10. *Ефименко Г. Г.* Металлургия чугуна / Г. Г. Ефименко, А. А. Гиммельфарб, В. Е. Левченко. – К.: Высш. школа, 1988. – 352 с.
11. Исследование работы доменной печи на разном количестве окатышей в шихте / И. И. Коробов, В. Н. Ковшов, А. И. Галаганов и др. // *Металлургия и коксохимия*. – 1975. – В. 43. – С. 41-45.
12. Исследование газопроницаемости доменной шихты при различном расположении слоев компонентов / В. П. Русских, В. В. Семаков, Д. И. Гаврилоглу и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – № 1. – С. 13-16.
13. *Галаганов А. И.* Особенности распределения шихты с окатышами на колошнике доменной печи / А. И. Галаганов // *Металлургия и коксохимия*. – 1978. – В. 59. – С. 26-28.
14. *Русских В. П.* Исследование влияния систем загрузки шихтовых материалов на распределение газового потока в доменной печи / В. П. Русских, М. А. Аленгос, Д. К. Степнов // *Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту : зб. наук. праць / ПДТУ*. – Мариуполь, 2009. – Вип. 19. – С. 21-24.

## Анотація

*Руських В. П., Семаков В. В., Семчук С. В.*

Порівняльний аналіз показників доменної плавки із застосуванням окатишів різної основності у шихті

*На основі математичного моделювання проаналізовано зміну показників доменної плавки при підвищенні основності окатків у шихті та різних ступенях використання відновної енергії газового потоку. Розглянута можливість виникнення каналного ходу доменної печі в результаті формування вертикальних міжшарових зон між агломератом і окатками.*

## Ключові слова

*агломерат, окатки, основність, витрата коксу, газопроницність, міжшаровий ефект, інтенсивність плавки*

## Summary

*Rusских V., Semakov V., Semchuk S.*

Comparative analysis of blast furnace melt indices with use of pellets with different basicity in charge

*The change of blast furnace melt indices during the increase of pellets basicity in charge and at different levels of gas flow reduction power was analyzed on the base of mathematical simulation. The opportunity of appearance of blast furnace channeling as a result of formation of vertical inter-layer areas between sintered ore and pellets was considered.*

## Keywords

*sintered ore, pellets, basicity, coke consumption, gas permeability, inter-layer effect, heat intensity*

Поступила 05.10.2015