

УДК 669.162.283

АНАЛИЗ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ НЛМК

Филатов С.В.¹, управляющий директор (filatov_sv@nlmk.ru)

Загайнов С.А.², д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Металлургия железа и сплавов» (zagainovsky@mail.ru)

Гилева Л.Ю.², к.т.н., доцент кафедры «Металлургия железа и сплавов» (ly.gileva@gmail.com)

Курунов И.Ф.¹, д.т.н., профессор, главный доменщик (kurunov_if@nlmk.com)

Титов В.Н.¹, начальник аглодоменного отдела Технического управления (titov_vn@nlmk.com)

¹ ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

(398004, Россия, Липецк, площадь Металлургов, 2)

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

Аннотация. Анализ эффектов и рисков основных мероприятий, направленных на снижение энергозатрат показал, что изменение какого-либо одного параметра, направленного на снижение энергозатрат малоэффективно, наибольший эффект достигается при совместном изменении нескольких переменных. Теоретический анализ позволил выявить основные комбинации изменения режимных параметров, которые обеспечивают наибольший эффект от действия того или иного фактора. Влияние гранулометрического состава агломерата на эффективность доменной плавки рассматривается через влияние среднего диаметра кусков на скорость восстановления и газодинамику верхней зоны печи. Показано, что колебания затрат тепла во многом определяются колебаниями восстановительной работы газового потока, которая, в свою очередь, зависит от гранулометрического состава агломерата. Установлено, что при приближении реакции $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$ к равновесию, снижение затрат тепла на выплавку чугуна достигается путем повышения интенсивности плавки. Проанализированы конкретные пути снижения затрат тепла на выплавку чугуна в доменных печах на примере ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Показаны основные мероприятия, обеспечивающие снижение затрат тепла в условиях комбината: оптимизация качества железорудных материалов за счет снижения доли фракции +45 мм; повышение интенсивности работы доменных печей до удельной производительности 75 – 90 т/сут с квадратного метра горна печи; работа доменных печей на повышенном до предельно допустимых (по конструкции засыпного аппарата) значений давления; повышение горячей прочности кокса до 60 – 62 %; вдувание пылеугольного топлива до 140 кг/т чугуна и оптимизация распределения рудной нагрузки по радиусу печи. В результате реализации указанных мероприятий в 2013 – 2016 гг. достигнуто снижение удельного расхода кокса более чем на 10 кг/т чугуна. При этом снижается не только удельный расход кокса, но и расход суммарного углерода топлива.

Ключевые слова: доменная печь, расход кокса, суммарный расход углерода, интенсивность плавки, повышенное давление, скорость восстановления оксидов железа, энергозатраты, потери тепла, качество шихтовых материалов, тепловой баланс.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-637-642

Энергоэффективность работы доменных печей целесообразно оценивать по расходу суммарного углерода топлива на 1 т выплавляемого чугуна заданного качества.

Снижение энергозатрат и затрат топлива достигается за счет повышения содержания железа в железорудной части шихты, повышения степени использования восстановительного потенциала газа, повышения температуры дутья и снижения потерь тепла в системе охлаждения доменной печи.

Средние энергозатраты на выплавку чугуна в доменных печах ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК) снизились до 20 ГДж/т чугуна. На некоторых доменных печах энергозатраты составляют 15 ГДж/т [1].

Эффективность восстановительного процесса в лучших доменных печах, работающих с применением хорошо подготовленных железорудных материалов и кок-

са с высокой горячей прочностью ($\text{CSR} > 65\%$), близка к термодинамическому пределу [2].

Анализируя эффекты и риски основных мероприятий, направленных на снижение энергозатрат, следует отметить, что изменение какого-либо одного параметра, направленного на снижение энергозатрат малоэффективно, наибольший эффект достигается при совместном изменении нескольких переменных [3 – 4].

Одним из путей снижения затрат тепла на производство чугуна является снижение потерь тепла. Анализ статей теплового баланса, выполненный с использованием методики, опубликованной в работе [5] показал, что колебания показателя, характеризующего затраты тепла в нижней зоне доменной печи (Q_n) и потерь тепла ($Q_{\text{пот}}$) во многом определяются колебаниями затрат тепла на развитие реакций прямого восстановления оксидов железа (рис. 1).

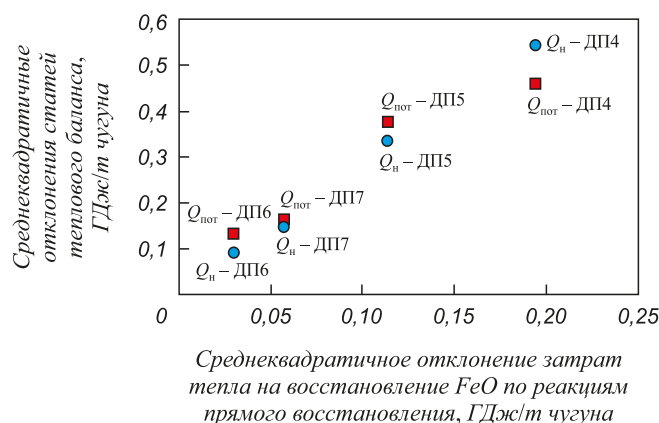


Рис. 1. Взаимосвязь между отклонением статей теплового баланса и колебанием затрат тепла на прямое восстановление FeO по данным за 2014 г.

Fig. 1. Connection of the heat balance deviation and variations of heat consumption at FeO direct reduction according to the operation data in 2014

Наличие взаимосвязи потерь тепла с затратами тепла на прямое восстановление FeO позволяет сформулировать следующий механизм влияния факторов на потери тепла. Вследствие изменений качества железорудных материалов и (или) распределения рудной нагрузки по радиусу печи происходит изменение степени развития косвенного, и, как следствие, прямого восстановления оксидов железа. Возникающий дефицит или избыток тепла компенсируется технологическим персоналом путем изменения прихода тепла в нижнюю зону доменной печи. Это сопровождается изменением процессов теплообмена как в верхней, так и в нижней зонах печи. При этом колебания потерь тепла сказываются на колебаниях состава продуктов плавки (рис. 2).

Приведенные данные показывают, что одним из путей повышения энергоэффективности выплавки чугуна в доменных печах является стабилизация процессов косвенного восстановления оксидов железа, которые во многом определяются степенью использования CO.

В рамках модели восстановления [6 – 8] взаимосвязь времени пребывания шихты в печи с изменением степени использования CO описывается уравнением [8]

$$\Delta\eta_{CO} = \frac{\eta_{CO}^p}{\eta_{CO}} \frac{ke^{k\tau}}{e^{k\tau} - 1} \Delta\tau,$$

где k – коэффициент, учитывающий влияние константы скорости реакции (значение k определяется по данным о работе доменных печей и находится в пределах от $-0,48$ до $-0,56$); η_{CO}^p , η_{CO} – равновесная и фактическая степень использования CO для реакции $FeO + CO = Fe + CO_2$; τ и $\Delta\tau$ – время и изменение времени пребывания шихты в зоне косвенного восстановления.

Из приведенного уравнения можно понять, что влияние времени пребывания шихты в печи на раз-

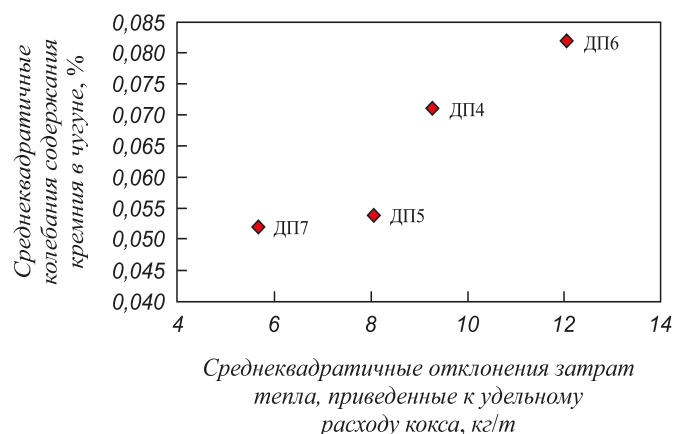


Рис. 2. Зависимость колебания кремния в чугуне от отклонения затрат тепла по данным за 2014 г.

Fig. 2. Dependence of silicon fluctuation in cast iron on the deviation of heat consumption according to the data in 2014

витие реакций косвенного восстановления в меньшей мере проявляется при приближении реакции $FeO + CO = Fe + CO_2$ к равновесию. К снижению влияния времени пребывания шихты в печи на развитие косвенного восстановления приводит также увеличение скорости химической реакции, которая зависит от температуры и размера кусков [9 – 10].

В результате совместного решения уравнений, описывающих газодинамику слоя и скорость восстановления, установлено, что наилучшие показатели работы печей будут достигаться при доле фракции 5 – 25 мм не менее 80 %. При этом доли фракций -5 и $+45$ не должны превышать 5 %. Аналогичные результаты приводятся в работе [11].

Повышение времени пребывания железорудной части шихты в доменной печи достигается при замене кокса пылеугольным топливом (ПУТ) [12 – 13]. Повышение рудной нагрузки при вдувании ПУТ приводит к снижению доли объема печи, занимаемого коксом. Следовательно, при прежней интенсивности плавки время пребывания железорудных материалов в зоне косвенного восстановления увеличивается. При освоении технологии выплавки чугуна с использованием ПУТ степень использования CO на доменных печах НЛМК возросла на 1,0 – 1,5 %.

При сопоставлении работы доменных печей, работающих с совместным использованием ПУТ и природного газа (ДП № 4, 5) с печами, где еще не освоено вдувание ПУТ, установлено, что суммарный расход углерода на доменных печах, работающих с вдуванием ПУТ меньше, а степень использования CO выше (табл. 1).

Повышение интенсивности доменной плавки приводит к снижению времени пребывания шихты в зоне косвенного восстановления. Однако это мероприятие сопровождается снижением потерь тепла, что отмечалось еще А.Д. Готлибом, по данным которого при неиз-

Таблица 1

Сопоставление работы доменных печей, работающих с использованием ПУТ с печами, работающими с использованием только природного газа

Table 1. Comparison of blast furnaces operating with the usage of pulverized coal and blast furnaces operating with the usage of natural gas only

Доменная печь	Суточная производительность, т/сут	Суммарный расход углерода, кг/т	Степень использования CO, %
ДП № 3	5040,2	429,6	46,4
ДП № 4	5803,9	409,3	49,9
ДП № 5	8093,9	413,4	50,1
ДП № 6	8810,5	415,1	48,9
ДП № 7	12 220,0	398,2	49,2

менных шихтовых условиях работы печи потери тепла обратно пропорциональны ее производительности [14]. Подтверждением этого являются результаты анализа взаимосвязи среднего суммарного расхода углерода с суточным производством доменной печи «Россиянка» по данным, усредненным за 10 сут (январь – апрель 2016 г.) (рис. 3).

Приведенные данные показывают, что повышение интенсивности плавки является эффективным способом энергосбережения при выплавке чугуна в доменных печах.

Одним из путей повышения интенсивности плавки и снижения потерь тепла является повышение давления под колошником при одновременном повышении качества кокса [15, 16]. Теоретический анализ условий, обеспечивающих эффективную работу доменных печей и сопоставление показателей их работы при различном давлении под колошником (табл. 2) приведен в работе [15]. Сопоставлялись периоды работы доменных печей за 2012 – 2014 гг. с давлением под колошником, отличающимся на ± 10 кПа от средних значений.

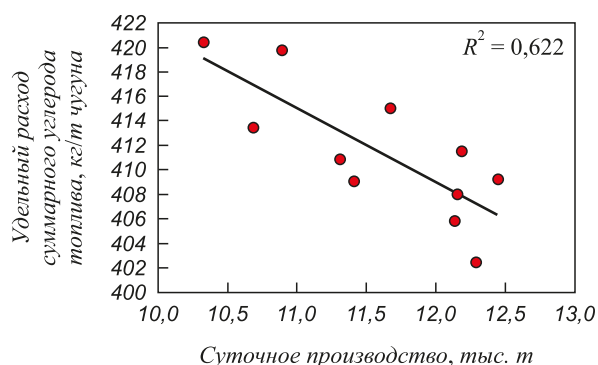


Рис. 3. Взаимосвязь суммарного расхода углерода с суточным производством доменной печи

Fig. 3. Connection of the total consumption of carbon and blast furnace daily production

Анализ показал, что эффективная работа доменных печей на давлении, максимально приближенном к технически обусловленному пределу, на каждой печи возможна только при высокой горячей прочности и высоком качестве агломерата. Это обусловлено тем, что при изменении давления под колошником верхний перепад давления изменяется в меньшей степени, чем нижний. При этом максимальный эффект достигается при сохранении верхнего и повышении нижнего перепада давления.

В реальных условиях доменной плавки возможности повышения нижнего перепада давления определяются размером кусков кокса в коксовой насадке, количеством и свойствами первичного шлака, количеством CO, образующегося при восстановлении железа из железистого первичного шлака, и протяженностью зоны когезии. Для условий работы доменных печей НЛМК рассчитано, что для сохранения нижнего перепада средний диаметр кусков кокса должен увеличиваться на 3,6 %, при этом степень косвенного восстановления повысится на 1,4 % и протяженность зоны вязкопластичного состояния уменьшится на 2,3 %.

Другим фактором, определяющим энергоэффективность доменной плавки, является распределение руд-

Таблица 2

Показатели работы доменных печей при различном давлении под колошником

Table 2. Performance of blast furnaces at different pressures under the furnace top

Показатель	Давление под колошником, кПа					
	ДП № 4		ДП № 6		ДП «Россиянка»	
	150	170	154	196	168	230
Удельный суммарный расход углерода топлива, кг/т чугуна	413,7	386,7	408,7	400,2	433,1	398,2
Удельная производительность, т/(м²·сут)	61,63	74,11	68,42	77,27	65,59	90,7
CSR, %	52	63	49	61	52	66,8

ной нагрузки по радиусу печи. Современные доменные печи, оборудованные бесконусным засыпным аппаратом, работают с так называемой «отдушиной» по оси печи. Выравнивание рудной нагрузки в промежуточной и периферийной зонах печи сопровождается повышением степени использования СО. При этом наблюдается повышение тепловых нагрузок на холодильники распара и заплечиков.

Современные представления о закономерностях теплообмена в доменной печи, разработанные и развиваемые Уральской школой металлургов [17 – 20], позволяют в качестве показателя неравномерности рассматривать отношение температуры периферийных газов к средней температуре колошниковога газа. Взаимосвязь тепловых нагрузок на холодильники с теплосъемом с заплечиков приводится на рис. 4.

Наличие этой зависимости подтверждается результатами математического моделирования влияния рудной нагрузки и диаметра кусков железорудных материалов на высоту верхней ступени теплообмена.

Задача распределения рудной нагрузки по радиусу печи рассматривается как задача оптимизации, а именно, достижение максимальной степени использования СО при допустимых нагрузках на холодильники. Реализация такого управления осуществляется путем изменения программы загрузки при превышении допустимого значения тепловых нагрузок на холодильники доменной печи.

В результате повышения интенсивности плавки, горячей прочности кокса и давления под колошником расход суммарного углерода топлива на доменных печах НЛМК в 2014 г. составил 426,3 кг/т чугуна, а в 2015 г. снизился до 423,2 кг/т чугуна.

По данным работы [21] суммарный расход твердого топлива на доменных печах НЛМК (кокс + природный

газ + ПУТ) является одним из самых наименьших в России.

Выводы. Основными мероприятиями, обеспечивающими повышение энергоэффективности доменной плавки на НЛМК, являются:

- оптимизация качества железорудных материалов;
- повышение интенсивности работы доменных печей;
- работа доменных печей на повышенном давлении;
- повышение горячей прочности кокса;
- вдувание пылеугольного топлива;
- оптимизация распределения рудной нагрузки по радиусу печи.

Реализация отмеченных мероприятий позволила снизить удельный расход углерода топлива на доменных печах НЛМК за 2013 – 2016 гг. более, чем на 10 кг/т чугуна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rammer B., Millner R., Boehm C. Comparing the CO₂ emission of different ironmaking rout // Proceedings of the VII European Coke and Ironmaking Congress – ECIC. 2016. P. 284 – 291.
2. Schmole P. The blast furnace – fit for future // Proceeding of the VII European Coke and Ironmaking Congress – ECIC. 2016. P. 3 – 12.
3. Товаровский И.Г. Процессы доменной плавки. Т. 2. Проблемы и перспективы. Изд. дом LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 406 с.
4. Товаровский И.Г. Доменная плавка. – 2-е изд. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 768 с.
5. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др.; Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 558 с.
6. Загайнов С.А., Онорин О.П., Гилева Л.Ю. Разработка и внедрение математического и программного обеспечения для гибких технологических режимов работы доменных печей // Сталь. 2000. № 9. С. 12 – 15.
7. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ, 2011. – 462 с.
8. Филатов С.В., Загайнов С.А., Гилева Л.Ю., Пыхтеева К.Б. Разработка методики анализа процессов восстановления оксидов железа // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 9. С. 658 – 661.
9. Шварцман А.А., Жуховицкий А.А. Начала физической химии для металлургов. – М.: Металлургия, 1991. – 208 с.
10. Шаврин С.В. Закономерности восстановления оксидов железа и моделирование металлургических процессов // Физическая химия и технологии в металлургии: Сб. науч. тр. – Екатеринбург: УрО РАН, 1966. С. 239 – 248.
11. Фролов Ю.А., Птичников А.Г., В.Х. Баринев В.Х., Горшков Н.Н. Методика расчета и анализ факторов, влияющих на расход кокса и производительность доменных печей ОАО «ЧМК» // Металлург. 2013. № 3. С. 42 – 49.
12. Тирьон К., Суворов М., Шмит Л. О комплексном подходе при вдувании ПУТ в доменные печи // Доменное производство – XXI век: Тр. Междунар. конгресса доменщиков. – М., 2014. С. 80 – 91.
13. Коксозамещающие технологии в доменной плавке / В.П. Лялюк, И.Г. Товаровский, Д.А. Демчук и др. – Днепропетровск: Пороги, 2006. – 276 с.
14. Готтлиб А.Д. Доменный процесс. – М.: Металлургия, 1966. – 503 с.

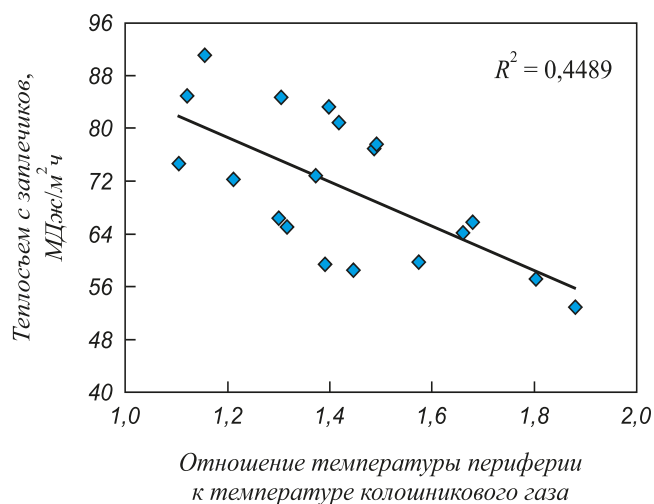


Рис. 4. Зависимость теплосъема с заплечиков от отношения температуры периферии к температуре колошниковога газа

Fig. 4. Dependence of heat removal from the shoulders on the ratio of periphery temperature to the top gas temperature

15. Филатов С.В., Загайнов С.А., Гилева Л.Ю. Влияние повышенного давления в доменной печи на эффективность ее работы // Сталь. 2015. № 4. С. 11 – 14.
16. Мищенко И.М., Кузин А.В. Качество кокса и другие важнейшие факторы обеспечения эффективной выплавки чугуна с применением пылеугольного топлива // Черная металлургия. Бюлл. ин-та «Черметинформация». 2014. № 5. С. 26 – 32.
17. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Д. Теплообмен в доменной печи. – М.: Металлургия, 1966. – 355 с.
18. Тепло- и массообмен в плотном слое / Б.И. Китаев, В.Н. Тимофеев, Б.А. Боковиков Б.А. и др. – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.
19. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов и др. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
20. Введение в системный анализ теплофизических процессов металлургии / Н.А. Спирин, В.С. Швыдкий, В.И. Лобанов, В.В. Лавров. – Екатеринбург: УГТУ, 1999. – 205 с.
21. Катунин В.В., Петракова Т.М., Иванова И.М. Основные показатели работы черной металлургии России в 2015 г. // Черная металлургия. Бюлл. ин-та «Черметинформация». 2016. № 3. С. 3 – 24.

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 8, pp. 637–642.

ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY INCREASE OF CAST IRON SMELTING IN NLMK BLAST FURNACES

**S.V. Filatov¹, S.A. Zagainov², I.F. Kurunov¹, V.N. Titov¹,
L.Y. Gileva²**

¹JSC “Novolipetsk Metallurgical Plant” Lipetsk, Russia

²Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The analysis of effects and risks of the main measures aimed at reducing energy costs has shown that the change in any one parameter is ineffective. The greatest effect can be achieved by the joint change of several variables. Theoretical analysis made it possible to identify the main combinations of changes in the regime parameters, which provide the greatest effect on the particular activity factor. The influence of the granulometric composition of the agglomerate on the efficiency of blast furnace smelting was examined through the influence of average diameter of the pieces, both on the rate of recovery and on the gas dynamics of furnace upper zone. It is shown that the variations in heat costs are largely determined by the fluctuations in recovery work of gas flow, which, in turn, depends on granulometric composition of the agglomerate. It was established that when the $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$ reaction is approached to balance, the heat loss reduction for cast iron smelting is achieved by increasing the melting intensity. The specific ways of reducing the heat costs for cast iron smelting in blast furnaces were analyzed on the example of PAO NLMK. It is shown that the main activities providing the reduction of heat losses in the plant conditions are: quality optimization of the iron ore materials due to the fraction decrease of +45 mm; increasing the intensity of the blast-furnace operation to relative production of 75 – 90 tons per day from square meter of the blast-furnace hearth; blast-furnace operation at the alarm pressure (according to the design of charging equipment); increasing the coke strength reactivity up to 60 – 62 %; pulverized coal injection up to 140 kg per ton of cast iron and optimization of the ore load distribution on the furnace’s radius. As a result of these measures implementation in 2013 – 2016, the coke rate reduction by more than 10 kg per ton of cast iron was achieved. In this case, not only the specific consumption of coke, but also the consumption of total carbon of fuel is reduced.

Keywords: blast-furnace, coke consumption, carbon total consumption, melting intensity, high-top pressure, reduction ratio of carbon oxides, energy consumption, heat losses, quality of the raw materials, heat balance.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-637-642

REFERENCES

1. Rammer B., Millner R., Boehm C. Comparing the CO_2 emission of different ironmaking rout. *Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC*. 2016, pp. 284–291.
2. Schmöle P. The blast furnace – fit for future. *Proceeding of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC*. 2016, pp. 3–12.
3. Tovarovskii I.G. *Protsessy domennoi plavki. Tom 2. Problemy i perspektivy: monografiya* [Blast furnace processes. Vol.2. Problems and perspectives: Monograph]. Izdatel'skii dom LAP LAMBERT Akademik Publishing, 2012, 406 p. (In Russ.).
4. Tovarovskii I.G. *Domennaya plavka: monografiya* [Blast furnace smelting: Monograph]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2009, 768 p. (In Russ.).
5. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu. etc. *Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh protsessov v ASU TP* [Mathematical modeling of metallurgical processes in automated process control system]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: OOO “UIPTs”, 2014, 558 p. (In Russ.).
6. Zagainov S.A., Onorin O.P., Gileva L.Yu., Volkov D.N., Tleugobulov B.S. Software for flexible blast-furnace operation. *Steel in Translation*. 2000, vol. 30, no. 9, pp. 9–11.
7. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Onorin O.P. *Model'nye sistemy podderzhki prinyatiya reshenii v ASU TP domennoi plavki* [Model decision support systems in the automated process control system of blast furnace smelting]. Ekaterinburg: UrFU, 2011, 462 p. (In Russ.).
8. Filatov S.V., Zagainov S.A., Gileva L.Yu., Pykhteeva K.B. Development of the analysis of iron oxide reduction processes. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 9, pp. 658–661. (In Russ.).
9. Shvartsman A.A., Zhukhovitskii A.A. *Nachala fizicheskoi khimii dlya metallurgov* [Fundamentals of physical chemistry for metallurgists]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 208 p. (In Russ.).
10. Shavrin S.V. Regularities of reduction of iron oxides and modeling of metallurgical processes. In: *Fizicheskaya khimiya i tekhnologii v metallurgii: sbornik nauchnykh trudov* [Physical chemistry and technologies in metallurgy: Coll. of sci. papers]. Ekaterinburg: UrO RAN, 1966, pp. 239–248. (In Russ.).
11. Frolov Yu.A., Ptichnikov A.G., Barinov V.Kh., Gorshkov N.N. Method of calculating and analyzing the factors that affect the coke consumption and productivity of blast furnaces at the Chelyabinsk Metallurgical Combine. *Metallurgist*. 2013, vol. 57, no. 3–4, pp. 183–193.
12. Tir'on K., Suvorov M., Shmit L. On integrated approach for pulverized coal fuel blowing into blast furnaces. In: *Domennoe proizvodstvo – XXI vek: trudy mezhdunarodnogo kongressa domenshchikov* [Blast furnace production – 21th century: Papers of Int. Congress of Blast Furnacemen]. Moscow: 2014, pp. 80–91. (In Russ.).
13. Lyalyuk V.P., Tovarovskii I.G., Demchuk D.A. etc. *Koksozameshchayushchie tekhnologii v domennoi plavke* [Coke-substituting technologies in blast furnace smelting]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2006, 276 p. (In Russ.).
14. Gotlib A.D. *Domennyi protsess* [Blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 503 p. (In Russ.).

15. Filatov S.V., Zagainov S.A., Gileva L.Yu., Kurunov I.F., Titov V.N. Influence of elevated pressure on blast-furnace performance. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 4, pp. 275–278.
16. Mishchenko I.M., Kuzin A.V. Quality of coke and other important factors for ensuring effective smelting of cast iron using pulverized coal. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2014, no. 5, pp. 26–32. (In Russ.).
17. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Lazarev B.D. *Teploobmen v domennoi pechi* [Heat transfer in blast furnace]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 355 p. (In Russ.).
18. Kitaev B.I., Timofeev V.N., Bokovikov B.A. etc. *Teplo- i massoobmen v plotnom sloe* [Heat and mass transfer in a dense layer]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 432 p. (In Russ.). (In Russ.).
19. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Sukhanov E.L. etc. *Teplotekhnika domennogo protsessa* [Thermal engineering of blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 248 p. (In Russ.).
20. Spirin N.A., Shvydkii V.S., Lobanov V.I., Lavrov V.V. *Vvedenie v sistemnyi analiz teplofizicheskikh protsessov metallurgii* [Introduction to the system analysis of thermophysical processes of metallurgy]. Ekaterinburg: UGTU, 1999, 205 p. (In Russ.).
21. Katunin V.V., Petrakova T.M., Ivanova I.M. Main performance indicators of the Russian ferrous metallurgy in 2015. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2016, no. 3, pp. 3–24. (In Russ.).

Information about the authors:

S.V. Filatov, Managing Director (filatov_sv@nlmk.ru)

S.A. Zagainov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Metallurgy of Iron and Alloys" (s.a.zagainov@urfu.ru)

I.F. Kurunov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Blast Furnaceman (kurunov_if@nlmk.com)

V.N. Titov, Head of the Agglomeration and Blast Furnace Division of the Technical Department (titov_vn@nlmk.com)

L.Y. Gileva, Cand. Sci. (Eng.) Assist. Professor of the Chair "Metallurgy of Iron and Alloys" (ly.gileva@gmail.com)

Received April 12, 2017