

УДК 662.73

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИТОПЛИВНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА В ПРАКТИКЕ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ЦЕХОВ*

Подгоредецкий Г.С.¹, к.т.н., директор научно-образовательного центра

«Новые металлургические технологии» (podgs@misis.ru)

Третьяк А.А.², заместитель генерального директора (treyakaa@gmail.com)

Горбунов В.Б.¹, к.т.н., заместитель директора научно-образовательного центра

«Новые металлургические технологии» (vbg1953@mail.ru)

Полулях Л.А.¹, к.т.н., старший научный сотрудник научно-образовательного центра

«Новые металлургические технологии» (larisa_m@misis.ru)

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

²ОАО «Черметинформация»

(117218, Россия, Москва, ул. Кржижановского, д. 14, корп. 3)

Аннотация. Проведен анализ использования пылеугольного топлива (ПУТ) в практике работы доменных печей РФ. Показано, что достигнутый уровень вдувания ПУТ значительно ниже, чем в лучших мировых практиках. Приведены факторы, затрудняющие развитие этого направления в России. Проанализированы мероприятия, предлагаемые для снижения выбросов углекислого газа при производстве чугуна (программа ULCOS). Предложено ввести в состав доменных цехов политопливные газогенераторы барботажного типа для производства горячих восстановительных газов (ГВГ) с целью их последующего вдувания в доменные печи. Выполнен расчет показателей работы доменной печи объемом 1033 м³ с вдуванием до 400 м³/т чугуна ГВГ. При вдувании 400 м³/т ГВГ экономия кокса составляет 100 – 120 кг/т чугуна. Ожидаемая экономия кокса при вдувании 700 м³/т ГВГ – до 200 кг/т чугуна. Предложено создать консорциум ведущих металлургических предприятий для отработки предлагаемой технологии в опытно-промышленном масштабе.

Ключевые слова: доменная печь, пылеугольное топливо, горячий восстановительный газ, политопливный газогенератор.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-879-885

В связи с принятием Россией международного обязательства по сокращению выбросов парниковых газов на 25 % к 2020 г. по сравнению с 1990 г. (указ Президента РФ № 257 от 30 сентября 2013 г.) актуальна проблема реализации энергосберегающих технологий, особенно в такой энергоемкой отрасли, как черная металлургия [1].

В настоящее время в мировой практике производства чугуна широко применяется вдувание пылеугольного топлива (ПУТ) в доменные печи, которое позволяет снизить расход кокса на 150 – 200 кг/т чугуна [2]. Эта технология отработана в промышленном масштабе, но не лишена серьезных недостатков: высокие капиталовложения; очень серьезные требования к качеству шихтовых материалов, кокса и вдуваемых углей. В условиях РФ высокие требования к качеству железорудных материалов и кокса практически не выполняются [3]. Небольшие объемы вдувания ПУТ, связанные с сырьевыми проблемами России, не позволяют окупать значительные вложения в строительство капиталоемких установок.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.278.21.0065 от 20.10.2014 г., уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57814X0065.

В условиях НПО «Тулачермет» были проведены опытно-промышленные испытания по отмывке колошниковых газов от CO₂ с последующим нагревом и вдуванием полученного горячего восстановительного газа в доменные печи. Расход кокса в опытный период снижался до 350 кг/т чугуна [1]. Аналогичные промышленные эксперименты были проведены консорциумом крупнейших металлургических корпораций и научно-исследовательских институтов на опытно-промышленной доменной печи. Исследования, проведенные в рамках снижения выбросов CO₂ (программа ULCOS), показали перспективность этого направления. Достигнута экономия кокса и снижение выбросов углекислого газа до 35 % [4].

Несмотря на перспективность этого направления, рециклинг колошниковых газов в мире и в РФ тормозится целым рядом обстоятельств; одной из причин является полное использование колошниковых газов в энергосетях комбинатов [5]. В этом случае рециклинг колошниковых газов нецелесообразен, так как необходимо замещать дефицит технических газов природным газом, лимиты на который и так выбираются полностью.

В мире широко распространены технологии газификации углей. Произведенный генераторный газ может

использоваться в качестве энергоносителя для производства электрической и тепловой энергии, использоваться в качестве энергоносителя на предприятиях черной и цветной металлургии, в качестве горячих восстановительных газов (ГВГ) для вдувания в доменные печи. Одной из наиболее перспективных разновидностей технологии газификации углей является их газификация в жидком шлаковом расплаве (в барботажных печах). В настоящей работе предлагается использовать политопливные газогенераторы для производства ГВГ с последующим вдуванием их в доменные печи [6].

Основные показатели работы доменных печей РФ в 2016 г.

За первое полугодие 2016 г. в доменных печах РФ было произведено 29,95 млн. т чугуна. Средний расход кокса на сухую массу составил 413,2 кг/т чугуна, расход каменного угля – 20,6 кг/т (расход ПУТ – 44,3 кг/т), расход природного газа – 96,7 м³/т. Из приведенных данных видно, что вдувание ПУТ в РФ находится на минимальном уровне. Содержание железа в железорудной части шихты (Fe), расходы кокса и ПУТ на металлургических комбинатах РФ приведены ниже.

Комбинат	Fe, %	Расход, кг/т чугуна	
		кокс	ПУТ
ЧерМК	61,60	404,1	17,7*
НЛМК	57,93	370,7	49,1
ММК	58,30	446,6	–
ЕВРАЗ НТМК	57,60	369,0	44,0
ЕВРАЗ ЗСМК	57,33	430,2	39,8
«Тулачермет»	58,70	445,2	–
«УралСталь»	55,50	466,6	–
ЧелМК	н.д.	452,0	–
Навладинский МЗ	55,50	452,0	–
Среднее, РФ	–	413,2	20,6

Примечание. * – загрузка кускового угля в доменные печи.

Наилучшие показатели по суммарному расходу кокса характерны для ОАО «Северсталь», ОАО «НЛМК», ОАО «ЕВРАЗ НТМК». Наибольшее количество ПУТ вдувается на НЛМК и НТМК (49,1 и 44,0 кг/т чугуна соответственно) [7].

Для сравнения в 2013 г. в КНР средний расход кокса составил 362 кг/т чугуна, среднее количество вдуваемого ПУТ – 149 кг/т [8]. Такие высокие показатели работы доменных печей КНР связаны с использованием высококачественных импортных сырьевых материалов. Так, импорт железной руды в КНР в 2013 г. составил 813 млн. т (более 70 % от потребления), импорт коксующихся углей в 2014 г. составил 126 млн. т (около 50 % от потребления) [6]. В условиях РФ достижение

таких показателей по вдуванию ПУТ затруднено, что связано с особенностями сырьевой базы и значительными логистическими затратами.

На рис. 1 приведены энергетические затраты при производстве чугуна на предприятиях РФ в первом полугодии 2016 г. Наилучшие удельные расходы условного топлива наблюдаются на предприятиях ОАО «ЕВРАЗ НТМК», «Тулачермет», НЛМК и ЧерМК. Средняя величина энергоёмкости передельного чугуна по РФ составила 656,3 кг у.т./т чугуна [7].

Учитывая сложности эксплуатации доменных печей, использующих ПУТ для вдувания, можно сделать вывод о необходимости поиска альтернативных путей снижения расхода кокса в доменных печах: одним из вариантов снижения расхода кокса является вдувание ГВГ.

Использование газогенераторов для производства ГВГ

Ранее упоминалось, что вдувание горячих восстановительных газов позволяет радикально снизить расход кокса. Важное мировое направление радикального снижения расхода кокса – программа ULCOS, направленная на снижение выбросов CO₂ при производстве чугуна [4]. Программа ULCOS предусматривает вдувание нагретых восстановительных газов в фурмы и шахту доменных печей. Технология опробована, получена значительная (до 35 %) экономия кокса. В нашей стране подобная технология в 1989 – 1990 гг. прошла опытно-промышленную проверку на «Тулачермет». Колошниковый газ отмывали от CO₂, нагревали и вдували в шахту печи через второй ряд фурм. Расход кокса был снижен до 350 кг/т чугуна. То есть направление вдувания ГВГ прошло предварительную опытно-промышленную проверку и показало свою перспективность [9].

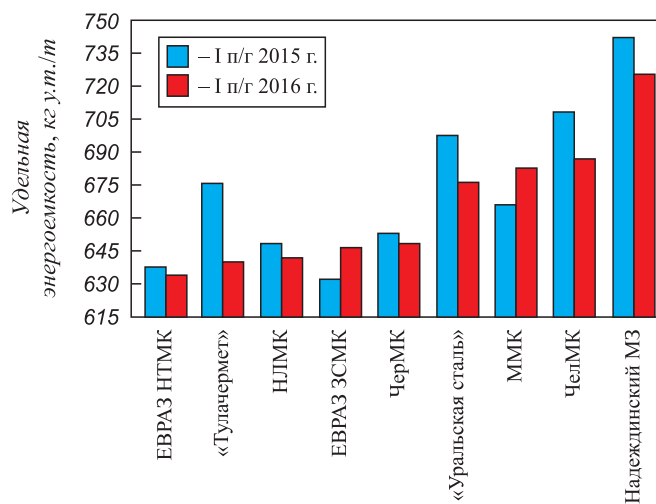


Рис. 1. Удельная энергоёмкость передельного чугуна на предприятиях РФ

Fig. 1. Energy intensity of pig iron at the enterprises of the Russian Federation

В настоящей работе предлагается разместить рядом с доменной печью газогенератор, работающий под давлением 0,4 – 0,6 МПа. Выходящие из газогенератора газы температурой 1500 – 1600 °С и химическим составом $\text{CO} + \text{H}_2 = 85 \div 90 \%$, $\text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = 10 \div 15 \%$ будут проходить первичную очистку (скруббер) и подаваться в существующие фурмы доменной печи через футерованный газопровод. Ориентировочная температура ГВГ на входе в доменную печь – 1200 – 1400 °С.

Предлагается использовать политопливный газогенератор барботажного типа, разработанный в НИТУ «МИСиС» [6]. В мире существует значительное количество технологий газификации углей:

- газификатор Лурги;
- газификатор Винклера;
- газификаторы Копперс-Тотцек, Шелл-Копперс;
- технология газификации Коноко-Филипс;
- технологии газификации Сименс;
- газификатор на базе процесса РОМЕЛТ.

Подробный анализ этих технологий газификации приведен в работе [10].

Отметим недостатки, присущие рассматриваемым технологиям:

- потребность в значительных капиталовложениях, окупаемых только при строительстве крупных установок;

- возможность переработки углей узкого круга, ограниченного маркой и крупностью углей;
- наличие собственных вторичных отходов (зола, отвальный шлак);
- невозможность переработки широкого спектра различных видов твердого топлива;
- недостатки конструкции, необходимость промежуточного охлаждения и компремирования генераторных газов (РОМЕЛТ);
- недостаточная экологическая чистота технологий, наличие экотоксикантов в продуктах переработки.

Практически все эти недостатки устранены в политопливном газогенераторе конструкции НИТУ «МИСиС»: газогенератор нового поколения позволяет эффективно перерабатывать широкий спектр наиболее дешевых углей и другого низкосортного твердого топлива в генераторный газ и/или электроэнергию. В отличие от многих современных технологий сжигания углей зола в политопливном газогенераторе переходит в шлак и далее – в товарные продукты. На базе предлагаемой технологии также возможна реализация совместной переработки твердого топлива со специально подготовленными твердыми бытовыми отходами (ТБО) [11]. Основные элементы конструкции политопливного газогенератора показаны на рис. 2.

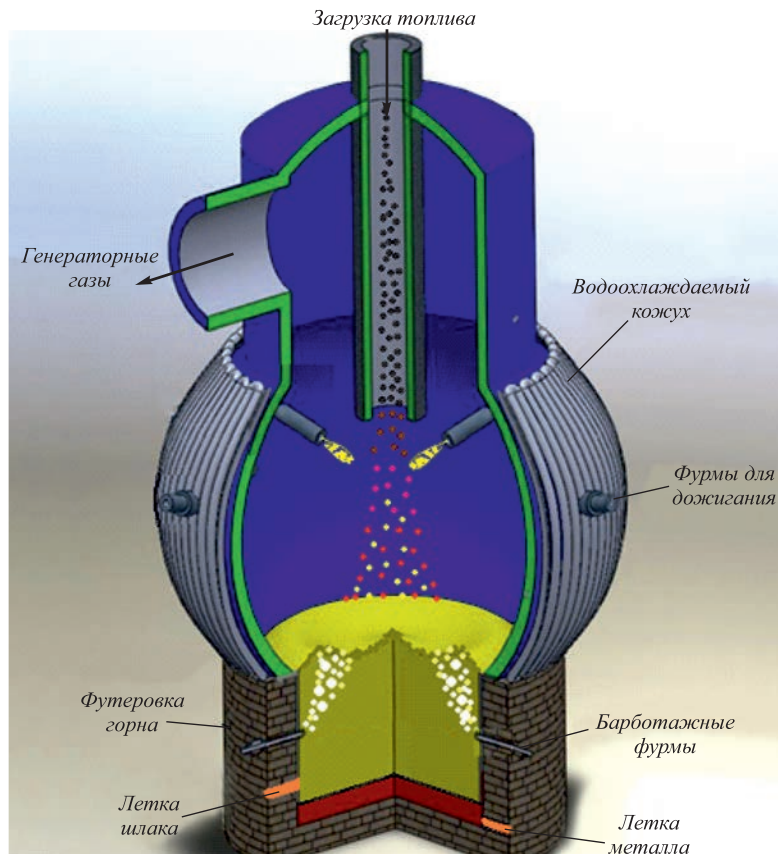


Рис. 2. Политопливный газогенератор конструкции НИТУ «МИСиС»

Fig. 2. Poly-fuel gas generator of NUST “MISIS” design

Технология газификации углей в слое расплавленного шлака рассмотрена в работах [12 – 14]. Отработку технологии газификации осуществляли на опытно-промышленной печи РОМЕЛТ на НЛМК. В ходе опытных кампаний было показано, что в слое барботируемого шлака возможно получать генераторный газ, остаточное содержание окислительных газов и азота в котором не превышает 10 – 15 %. Главными недостатками печи РОМЕЛТ являются ее конструктивные особенности и работа под разрежением. Эти недостатки устранены в конструкции политопливного газогенератора: изменена форма; предусмотрена работа газогенератора под давлением 0,4 – 0,6 МПа.

Другой отличительной особенностью политопливного газогенератора является возможность работы практически на любых видах твердого топлива. Схема установки политопливного газогенератора приведена на рис. 3.

В качестве сырьевых материалов могут быть использованы: угли любых марок; отходы углеобогащения; торф; горючие сланцы; отходы деревообработки; биомасса; отходы нефтепереработки; твердые бытовые отходы.

Продуктами переработки являются: генераторный газ; шлак; металлический сплав; пар энергетических параметров.

В качестве продукта переработки может быть использован также металлический сплав на базе чугуна. Это важно при переработке топлива, содержащего повышенное содержание железа в золе. Другим вариан-

том использования политопливного газогенератора является возможность использования железосодержащих отходов, количество которых определяется тепловым состоянием газогенератора и возможностью увеличивать подачу окислительных газов в доменную печь.

Моделирование вдувания ГВГ в доменные печи

Расчеты выполнены на балансовой модели «Расчет показателей работы доменных печей» кафедры энергоэффективных ресурсосберегающих промышленных технологий НИТУ «МИСиС». Методика базируется на расчетной модели Риста (модель Курунова-Ященко) [15]. Моделирование проводили для условий доменной печи объемом 1033 м³.

Исходные данные для моделирования:

- химический состав шихтовых материалов (принят для условий ММК): агломерат (70 %) и окатыши (30 %);
- содержание железа в агломерате – 52,2 %, в окатышах – 62,5 %;
- основность $[(CaO + MgO)/(SiO_2 + Al_2O_3)]$ агломерата – 2,13, окатышей – 0,38;
- содержание золы в коксе – 11,94 %;
- содержание серы в коксе – 0,52 %;
- содержание кислорода в горячем дутье – 21 %;
- температура дутья – 1120 °С;
- содержание кремния в чугуне – 0,74 %.

Температура ГВГ для всех вариантов принята 1200 °С.

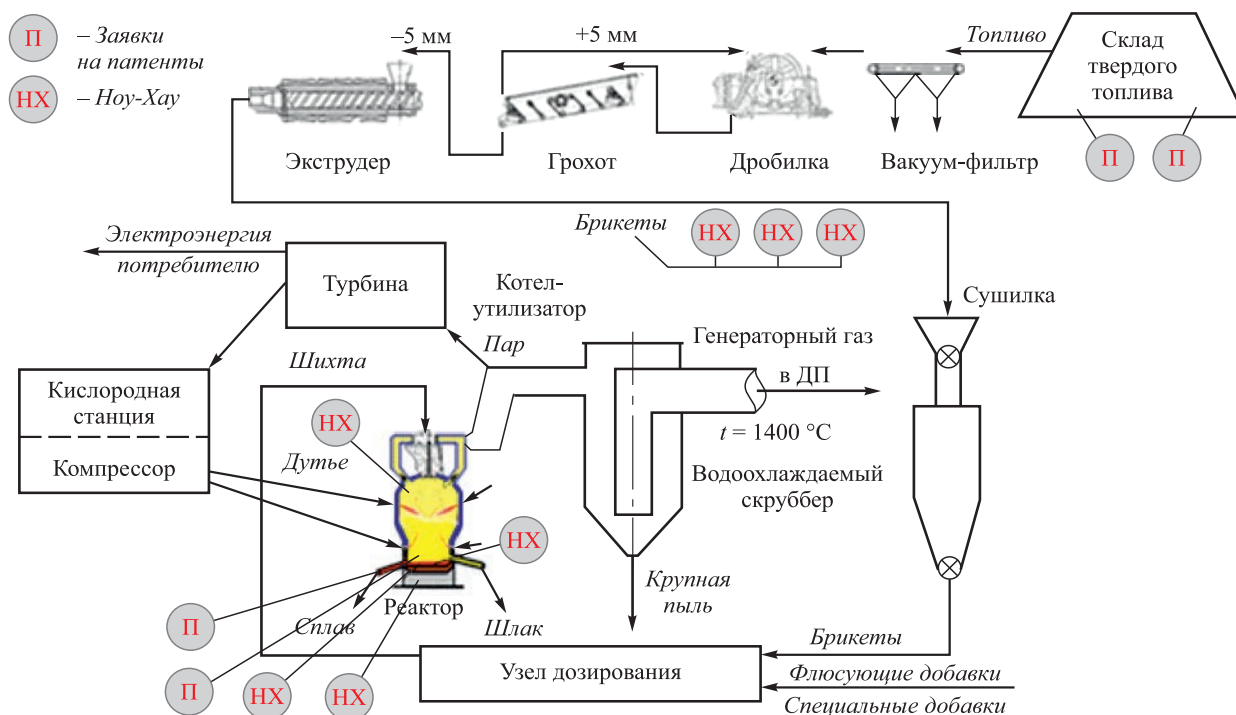


Рис. 3. Схема установки политопливного газогенератора

Fig. 3. Scheme of poly-fuel gas generator

Состав ГВГ:

1 – 70 % CO, 20 % H₂, 10 % смеси N₂ + CO₂ (сухое топливо);

2 – 45 % CO, 45 % H₂, 10 % смеси N₂ + CO₂ (влажное топливо).

Результаты расчетов приведены в таблице.

Вдувание ГВГ на уровне до 400 м³/т чугуна приводит к существенному (до 104 кг/т чугуна) снижению расхода кокса. При этом расход дутья снижается на 200 – 220 м³/т, расход шлага снижается на 10 кг/т. Важно отметить, что производительность печи во всех вариантах не снижается. Несколько возрастают выход и калорийность колошникового газа.

По результатам расчетов можно сделать следующие промежуточные выводы:

- для печи объемом 1033 м³ достаточен (по выходу ГВГ ~ 35 000 м³/ч) газогенератор площадью 5 м²;
- при вдувании 400 м³ ГВГ на 1 т чугуна снижение расхода кокса доходит до 104 кг;
- можно снижать расход кислорода и горячего дутья без потери производительности доменных печей, высвобождающиеся энергоносители при этом могут вдуваться в газогенератор;
- при отработке программы ULCOS объемы вдуваемых ГВГ на опытной печи довели до 700 м³/т чугуна без проблем с газодинамикой; в этом случае возможна экономия кокса до 150 – 180 кг/т чугуна.

Следующим этапом развития предлагаемой технологии является опробование в опытно-промышленном масштабе политопливного газогенератора. В настоящее время НИТУ «МИСиС», ООО «НМТ» совместно с ООО «ПК Вторалюминпродукт», ООО «ПК МЕТПРОМ», ООО «Энерготерм Система» выполнены проектные работы и заканчивается монтаж пилотной установки универсального барботажного реактора в г. Мценске (Орловская область). Основное финансирование проектных работ, закупки узлов, комплектующих и монтажа оборудования пилотной установки осуществлялось ООО «ПК Вторалюминпродукт» без привлечения государственного финансирования. Запуск установки запланирован в декабре 2016 г. На пилотной установке планируется опробование в опытно-промышленном масштабе технологии политопливного газогенератора и отработка режимов работы при газификации различных видов твердого топлива.

Перспективы развития проекта:

- отработка на пилотном реакторе (г. Мценск) в опытно-промышленных масштабах технологий безотходной газификации низкосортных углей, отходов углеобогащения, торфа, горючих сланцев, отходов деревообработки, сельскохозяйственных отходов, биомассы, отходов нефтепереработки, ТБО;

Результаты расчета показателей работы доменной печи при вдувании ГВГ

Calculation results of blast furnace performance when HRG blowing

Параметр		Вариант						
		База	1	2	3	4	5	6
Расход ГВГ, м ³ /т		0	102,6	102,6	205,1	205,1	410,3	410,3
Содержание в ГВГ, %	CO	–	70,0	45,0	70,0	45,0	70,0	45,0
	H ₂	–	20,0	45,0	20,0	45,0	20,0	45,0
	CO ₂	–	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
	N ₂	–	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Температура ГВГ, °C		–	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Результаты расчета								
Производительность, т/сут.		1335,0	1347,8	1356,0	1358,1	1380,4	1376,2	1421,4
Расход кокса, кг/т		496,0	471,4	469,7	447,3	443,5	399,2	391,7
Коэффициент замены, кг/м ³			0,240	0,256	0,237	0,256	0,236	0,254
Расход воздушного дутья, м ³ /т		1233,1	1189,0	1196,3	1143,4	1157,5	1049,1	1074,2
Выход шлага, кг/т		415,9	413,5	413,4	411,1	410,8	406,5	405,9
Основность шлага		1,41	1,42	1,42	1,44	1,44	1,47	1,48
Выход колошникового газа, м ³ /т		1918	1931	1927	1945	1935	1975	1955
Температура колошникового газа, °C		214,5	230,3	227,0	246,6	239,2	278,5	265,3
Содержание колошниковом газе, %	CO	21,09	22,46	21,70	23,80	22,31	26,40	23,45
	CO ₂	19,98	20,45	20,05	20,90	20,15	21,81	20,36
	H ₂	3,78	4,34	5,04	4,90	6,38	6,02	9,08
	N ₂	55,15	52,75	53,21	50,40	51,17	45,76	47,11

- дооснащение пилотной установки оборудованием для подготовки генераторного газа;
- создание консорциума ведущих металлургических предприятий для опытно-промышленной отработки технологии вдувания ГВГ в доменные печи;
- разработка рабочего проекта политопливного газогенератора и комплекса для подачи ГВГ в доменные печи;
- строительство и запуск в эксплуатацию опытно-промышленного комплекса по вдуванию ГВГ.

Выводы. Расчеты, крупно-лабораторные (программа ULCOS), опытно-промышленные (НПО «Тулачермет») эксперименты убедительно показывают, что большей энергоэффективности в доменном переделе можно достичь вдуванием ГВГ, а не ПУТ. В условиях России перспективным источником ГВГ могут стать газогенераторы, основанные на принципах печей барботажного типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Soskovets O.N., Shevelev L.N., Shatlov V.A., Marsuverskii B.A., Eremin V.I., Roginko S.A. Improving the energy efficiency of blast furnaces by means of hot reducing gases // *Steel in Translation*. 2014. Vol. 44. No. 5. P. 394 – 398.
2. Современный доменный процесс. Введение / М. Геердес, Р. Чень, И. Курунов и др. – М.: ООО «Металлургиздат», 2016. – 274 с.
3. Требования, предъявляемые к качеству шихтовых материалов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.metalspace.ru/education-career/osnovy-metallurgii/domennaya-pech/397-trebovaniya-pred-yavlyaemye-k-kachestvu-shikhtovykh-materialov.html> (Дата обращения 1 ноября 2016 г.).
4. Ян ван дер Стел, Г. Лоуверсе, Д. Серт, А. Хирш, Н. Эклунд. Доменная печь ULCOS с рециклингом колошниковога газа для минимизации выбросов CO₂ – окончательный результат испытаний // *Steel Times International* на русском языке. 2013. Сентябрь. С. 36 – 38.
5. Шульц Л.А. Энерго-экологические интегральные показатели производства стали // *Экология и промышленность России*. 2004. № 7. С. 30 – 33.
6. Разработка технологии и технических решений политопливного газогенератора на базе местных и возобновляемых топливных ресурсов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://xprir.ru/conference2015/theses/14.578.21.0065> (Дата обращения 1 ноября 2016 г.).
7. Петракова Т.М. Основные показатели работы черной металлургии за период первое полугодие 2016 г. // *Черная металлургия*. Бюл. ин-та «Черметинформация», 2016. № 10. С. 3 – 9.
8. Шевелев Л. Наибольший потенциал снижения выбросов парниковых газов – в доменном производстве [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.time-innov.ru/page/press/overall/article/393> (Дата обращения 1 ноября 2016 г.).
9. Podgorodetskii G.S., Yusfin Yu.S., Sazhin A.Yu., Gorbunov V.B., Polulyakh L.A. Production of Generator Gas from Solid Fuels // *Steel in Translation*. 2015. Vol. 45. No. 6. P. 395 – 402.
10. Метод утилизации твердых бытовых отходов в печи с барботируемым шлаковым расплавом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://misis.ru/spglnk/9fc62f77> (Дата обращения 1 ноября 2016 г.).
11. Иванова И.М. Использование материальных и энергетических ресурсов. // *Черная металлургия*. Бюл. ин-та «Черметинформация», 2016. № 10. С. 9 – 15.
12. Xuegong Bi, Shourong Zhang. The Past. The Present and the Prospects of Ironmaking In China. Proceeding of the 7-th International congress of Ironmaking Technologies. AIST. – 2015. Vol. 1. P. 1472 – 1480.
13. Процесс Ромелт / Под ред. В.А. Роменца. – М.: ИД. «Руда и Металлы», 2005. – 400 с.
14. Газификация угля в шлаковом расплаве / А.В. Баласанов, В.Е. Лехерзак, В.А. Роменец, А.Б. Усачев; под ред. А.Б. Усачева. – М.: «Институт Стальпроект», 2008. – 288 с.
15. Металлургия чугуна: Учебник для вузов / Е.Ф. Вегман, Н.Ф. Жеребин, А.Н. Поквиснев и др.; под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: Академкнига, 2004. – 774 с.

Поступила 14 ноября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 12, pp. 879–885.

PERSPECTIVE USE OF POLY-FUEL GAS GENERATOR IN PRACTICE OF BLAST-FURNACE SHOPS

G.S. Podgorodetskii¹, A.A. Tretyak², V.B. Gorbunov¹, L.A. Polulyakh¹

¹National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

²JSC “Chermetinformatsiya”, Moscow, Russia

Abstract. The analysis of the use of pulverized coal injection (PCI) in the practice of blast furnaces of the Russian Federation was made. It is shown that the current level of injecting of PCI is much lower than in the world’s best practices. The factors hindering the development of this direction in Russia are presented. The authors have analyzed the activities suggested in order to reduce carbon dioxide emissions from the production of iron (ULCOS program). It is proposed to enter the poly-fuel gas generators of bubble type into the blast-furnace shops for the production of hot reducing gases (HRG) for subsequent injection into blast furnaces. The calculation was made for the performance of blast furnace with volume of 1033 m³ and HRG injection of up to 400 Nm³/t of cast iron. When such HRG injection the coke savings are 100–120 kg/t of cast iron. Expected savings of coke while HRG

injection of 700 Nm³/t are up to 200 kg/t of cast iron. It is proposed to create a consortium of leading metallurgical enterprises for testing the proposed technology in pilot industrial conditions.

Keywords: blast furnace, pulverized coal, hot reducing gases, poly-fuel gas generator.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-879-885

REFERENCES

1. Soskovets O.N., Shevelev L.N., Shatlov V.A., Marsuverskii B.A., Eremin V.I., Roginko S.A. Improving the energy efficiency of blast furnaces by means of hot reducing gases. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 5, pp. 394–398.
2. Geerdes M., Chen’o R., Kurunov I., Lingardi O., Rikkets D. *Sovremennyy domennyi protsess. Vvedenie* [Modern blast-furnace process. Introduction]. Moscow: ООО “Metallurgizdat”, 2016, 274 p. (In Russ.).
3. *Trebovaniya, pred’yavlyaemye k kachestvu shikhtovykh materialov* [Requirements for the quality of the raw materials]. Available at URL: <http://www.metalspace.ru/education-career/osnovy-metallur>

- gii/domennaya-pech/397-trebovaniya-pred-yavlyaemye-k-kachestvu-shikhtovykh-materialov.html (In Russ.).
4. Yan van der Stel, Louverse G., Sert D., Hirsh A., Eklund N. ULCOS blast furnace with recycling of top gas to minimize CO₂ emissions – the final test results. *Steel Times International. Russian Issue*. September 2013, pp. 36–38. (In Russ.).
 5. Shul'ts L.A. Energy and environmental integrated indicators of steel production. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2004, July, pp. 30–33. (In Russ.).
 6. *Razrabotka tekhnologii i tekhnicheskikh reshenii politoplivnogo gazogeneratora na baze mestnykh i vozobnovlyaemykh toplivnykh resursov* [Development of technology and technical solutions of poly-fuel gas generator based on local and renewable fuel resources]. Available at URL: <https://xpir.ru/conference2015/theses/14.578.21.0065> (In Russ.).
 7. Petrakova T.M. Main indicators of ferrous metallurgy during the first half of 2016. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2016, no. 10, pp. 3–9. (In Russ.).
 8. Shevelev L. *Naibol'shii potentsial snizheniya vybrosov parnikovykh gazov v domennom proizvodstve* [The greatest potential for reducing greenhouse gas emissions - in blast furnaces]. Available at URL: <http://www.time-innov.ru/page/press/overall/article/393> (In Russ.).
 9. Podgorodetskii G.S., Yusfin Yu.S., Sazhin A.Yu., Gorbunov V.B., Polulyakh L.A. Production of generator gas from solid fuels. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 6, pp. 395–402.
 10. *Metod utilizatsii tverdykh bytovykh otkhodov v pechi s barbotiruemym shlakovym rasplavom* [The method of solid waste utilization in a furnace with bubbling melted slag]. Available at URL: <http://misis.ru/spglnk/9fc62f77> (In Russ.).
 11. Ivanova I.M. Use of material and energy resources. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2016, no. 10, pp. 9–15. (In Russ.).
 12. Xuegong Bi, Shourong Zhang. The past, the present and the prospects of ironmaking in China. *Proceeding of the 7-th International congress of Ironmaking Technologies. AIST*. 2015, vol. 1, pp. 1472–1480.
 13. *Protsess Romelt* [Romelt process]. Romenets V.A. ed. Moscow: MISiS, ID Ruda i Metally, 2005, 400 p. (In Russ.).
 14. *Gazifikatsiya uglja v shlakovom rasplav* [Coal gasification into slag melt]. Usachev A.B. ed. Moscow: "Institut Stal'proekt", 2008, 288 p. (In Russ.).
 15. Vegman E.F., Zherebin N.F., Pokhvisnev A.N., Yusfin Yu.S., Kurunov I.F., Paren'kov A.E., Chernousov P.I. *Metallurgiya chuguna: uchebnik dlya vuzov* [Ironmaking: Textbook for universities]. Yusfin Yu.S. ed. Moscow: Akademkniga, 2004, 774 p. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, the agreement no. 14.278.21.0065 of 20.10.2014, unique identifier of the agreement is RFMEF157814X0065.
- Information about the authors:**
- G.S. Podgorodetskii**, *Cand. Sci. (Eng.), Director of the Scientific and Educational Center "New Metallurgical Technologies"* (podgs@misis.ru)
- A.A. Tretyak**, *Deputy General Director* (tretyakaa@gmail.com)
- V.B. Gorbunov**, *Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Scientific and Educational Center "New Metallurgical Technologies"* (vbg1953@mail.ru)
- L.A. Polulyakh**, *Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Scientific and Educational Center "New Metallurgical Technologies"* (larisa_m@misis.ru)

Received November 14, 2016