

УДК 669.162

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРИАДЫ ДОМЕННАЯ ПЕЧЬ, КИСЛОРОДНЫЙ КОНВЕРТЕР, ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА

*Лисиенко В.Г., д.т.н., профессор кафедры информационных технологий
и автоматики (V.G.Lisienko@urfu.ru)*

*Чесноков Ю.Н., к.т.н., доцент кафедры информационных технологий
и автоматики (j.n.chesnokov@urfu.ru)*

Лантева А.В., ст. преподаватель кафедры автоматики (A.V.Lapteva@urfu.ru)

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620078, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 32)

Аннотация. Углеродный след – масса углерода, образованная в полном цикле производства того или иного продукта. Этот углерод входит в состав парниковых газов. При производстве чугуна и стали образуются оксид углерода, парниковые газы: метан, диоксид углерода. Метан и оксид углерода сгорают до диоксида углерода при реализации вторичных энергетических ресурсов. Таким образом, углеродный след при производстве чугуна и стали определяется массой диоксида углерода, образованного в этом производстве. В результате анализа процессов производства чугуна и стали выявлено, что тандем доменной печи с электродуговой печью характеризуется меньшим значением интегральной сквозной эмиссии CO_2 , чем тандем доменной печи с кислородным конвертером. Предложено перерабатывать чугун, производимый одной доменной печью, одновременно в кислородном конвертере и одной или нескольких электродуговых печах. При этом в электродуговую печь загружается 30 % чугуна от произведенного его объема доменной печью, а остальные 70 % дополняются металлически ломом. В кислородный конвертер загружается часть чугуна (75 – 85 %), который остался после загрузки электродуговой печи. Для полной загрузки конвертера применяется металлический лом. Проведены расчеты сквозной эмиссии диоксида углерода для различных триад таких агрегатов. Из этих расчетов следует, что одновременное применение кислородных конвертеров с электродуговыми печами для выплавки чугуна, полученного от одной доменной печи, позволяет уверенно снизить эмиссию диоксида углерода до 20 %. Это свидетельствует о том, что такая триада применяемых агрегатов соответствует зеленым технологиям. Примером использования отмеченной триады является Магнитогорский металлургический комбинат, на котором, наряду с кислородным конвертером, применяются электродуговые печи для выплавки стали с использованием производимой на предприятии электроэнергии сжиганием топливных вторичных энергетических ресурсов, получаемых от агрегатов, в которых сгорает топливо. Такая практика может быть рекомендована для целого ряда других металлургических предприятий.

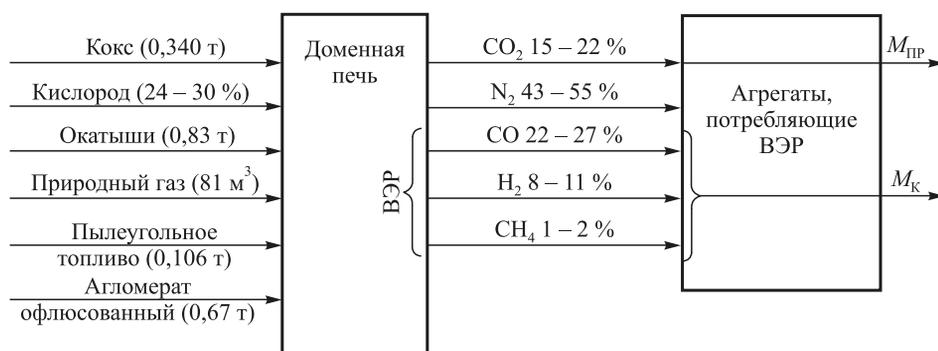
Ключевые слова: эмиссия диоксида углерода, углеродный след, чугун, сталь, доменная печь, кислородный конвертер, электродуговая печь.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-623-628

Широко известно понятие углеродного следа – массы парниковых газов, выделяющихся при производстве той или иной продукции [1 – 6]. В отраслевых и федеральных документах поставлена задача уменьшения выбросов парниковых газов в черной металлургии. В агрегатах черной металлургии образуется два вида парниковых газов: диоксид углерода и метан. Кроме того, в отходящих газах этих агрегатов содержится значительное количество оксида углерода (рис. 1). Метан и оксид углерода являются топливными вторичными энергетическими ресурсами (ВЭР), которые сгорают в других агрегатах или в свече, образуя диоксид углерода. На этом основании будем считать, что единственный парниковый газ, образующийся в агрегатах черной металлургии – диоксид углерода. Нештатными выбросами можно пренебречь, например, оксидом углерода при выпуске чугуна из доменной печи, который уходит в атмосферу в неизменном виде.

Известные методики определения эмиссии диоксида углерода в металлургии ориентированы на определение этой эмиссии для каждого агрегата. Требуется оценка, сколько и в каких соотношениях сгорают в этих агрегатах различные виды углеродосодержащего топлива [7 – 11]. Данное обстоятельство затрудняет определение углеродного следа. В представленной работе предложена иная методика определения эмиссий диоксида углерода агрегатами черной металлургии [12 – 13].

Каждый агрегат, образующий вторичные энергетические ресурсы, характеризуется прямой и косвенной эмиссией диоксида углерода. Прямая эмиссия $M_{\text{пр}}$ определяется массой диоксида углерода, выделяющегося в этом агрегате. Эта эмиссия зависит от режима работы агрегата и может колебаться в широких пределах. Косвенная эмиссия диоксида углерода $M_{\text{к}}$ соответствует сжиганию оксида углерода и метана, выработанными этим агрегатом.



Образование прямой и косвенной эмиссии CO₂ при работе доменной печи

Formation of direct and indirect CO₂ emissions at work of BF

Введено понятие интегральной эмиссии агрегата или процесса, как суммы прямой и косвенной эмиссии:

$$M_{\Pi} = M_{\text{пр}} + M_{\text{к}}. \quad (1)$$

Таким образом, всю эмиссию CO₂ относим к агрегату, генерирующему ВЭР. При этом образование эмиссии CO₂ агрегатами, потребляющими ВЭР (нагревательные печи, коксовые батареи, доменные воздухонагреватели и другие агрегаты), исключается из рассмотрения с целью предотвращения двойного счета. Таким образом, из представлений о прямой и косвенной эмиссии формируется математическая модель образования эмиссий CO₂ агрегатами, связанными с топливными ВЭР.

Такой подход повышает точность оценки эмиссии CO₂ процесса и упрощает методику сравнения различных процессов по эмиссии диоксида углерода, в том числе тех, для которых нет данных по объемам и составу углеродосодержащих выбросов, но есть данные по расходам топлива.

Таким образом, массу CO₂, образующегося в доменном, коксохимическом, электродуговом процессах будем определять с учетом дожигания СО по суммарной массе углерода, содержащегося в исходном топливе. В кислородно-конвертерном процессе с дожиганием масса CO₂ будет пропорциональна массе окислившегося углерода из шихты. При таком подходе эмиссия CO₂ процесса определяется с достаточной точностью массой сгоревшего углерода в этом агрегате.

Эмиссия CO₂ агломерационного процесса может быть определена при следующих исходных данных: в качестве топлива шихты используется 64 кг коксика ($C_p = 83\%$), для горна – природный газ ($C_p = 73,4\%$) с расходом 3,0 м³/т офлюсованного агломерата. Образование CO₂ при сжигании в горне других видов топлива – коксового или доменного газа, учитывается при анализе коксохимического или доменного производства. Для получения офлюсованного агломерата в шихту добавляется 268 кг известняка, что приводит к выделению 118 кг CO₂.

Понятие углеродного следа в черной металлургии сведем к понятию интегральной сквозной эмиссии диоксида углерода M_C , которая является суммой эмиссий CO₂, последовательно возникающих во всех процессах технологической цепи, начиная с добычи сырья и кончая тем продуктом, для которого эта эмиссия определяется. Кроме интегральной эмиссии CO₂ процесса M_{Π} , будем рассматривать транзитную эмиссию M_T , обусловленную долей от суммарной массы эмиссии CO₂, образованного в предыдущих процессах, которая перешла на анализируемый процесс. Сквозная интегральная эмиссия CO₂ M_C удовлетворяет соотношению

$$M_C = M_{\Pi} + M_T. \quad (2)$$

Слово «интегральная» будем опускать, однако все эмиссии CO₂, рассматриваемые далее, являются интегральными. Кроме того, словом «эмиссия» будет обозначаться эмиссия CO₂.

Для определения сквозной эмиссии CO₂ для продукта удобно использовать модели в виде сигнальных графов – графы эмиссий CO₂. Пример графа эмиссий CO₂ производства конвертерной стали был представлен в работе [14].

В вершинах графа указаны в скобках эмиссии процесса и через черту – сквозные эмиссии. Эти эмиссии – аналоги сигналов. На дугах графа проставлены величины, равные удельным массовым расходам соответствующего ресурса. Сквозная эмиссия процесса определяется сложением эмиссии процесса и транзитной эмиссии, равной сумме произведений сквозных эмиссий предыдущих процессов на расходы, указанные на дугах графа.

В работе [15] были представлены значения эмиссий диоксида углерода в различных сочетаниях металлургических переделов производства стали. В табл. 1 приведены уточненные значения сквозных эмиссий CO₂ конкретно для сочетаний процессов доменная печь (ДП) с кислородным конвертером (КК) и доменная печь с электродуговой печью (ЭДП) при различных значениях процента чугуна в металлической шихте.

Таблица 1

Значения сквозных эмиссий для тандемов процессов ДП с КК и ДП с ЭДП

Table 1. Values of through emissions for tandems of processes of BF with OC and BF with EAF

Передел	Сквозная эмиссия CO ₂ , кг/т продукции
ДП + ЭДП с 30 % чугуна в шихте	1 401
ДП + КК с 75 % чугуна в шихте	2 048
ДП + КК с 80 % чугуна в шихте	2 166
ДП + КК с 85 % чугуна в шихте	2 286

Тандем доменной печи с электродуговой печью характеризуется сквозной эмиссией (углеродным следом) CO₂, равной 1401 кг/т стали, а доменной печи с кислородным конвертером – 2166 кг/т стали. Заменить кислородные конвертеры электродуговыми печами невозможно. Проблема заключается в том, что для переработки всего чугуна, выпущенного доменной печью за сутки, одной электродуговой печи будет недостаточно.

Для решения этой задачи рассмотрены производительности различных сочетаний доменной печи, кислородного конвертера и электродуговых печей в сравнении с производительностями доменных печей различного объема. Выбраны следующие значения суточной производительности доменных печей P_{ДП}:

- 4800 т/сут (Магнитогорский металлургический комбинат, ДП № 10);
- 7400 т/сут (Нижнетагильский металлургический комбинат, ДП № 5);
- 8100 т/сут (Новолипецкий металлургический комбинат, ДП № 6);
- 10 800 т/сут (Череповецкий металлургический комбинат, ДП № 5) [16].

Рассматриваемые электродуговые печи и их параметры приведены в табл. 2 [17 – 22], в которой суточная производительность электродуговых печей P_{ЭДП} определяется ориентировочно как

Таблица 2

Параметры выбранных для анализа электродуговых печей

Table 2. Parameters of the electric arc furnaces chosen for the analysis

V _{ЭДП} , т	T _{ЭДП} , мин	P _{ЭДП} , т/сут	Сквозная эмиссия CO ₂ , т/сут
100	50	2 880	4 032
150	50	4 320	6 048

$$P_{\text{ЭДП}} = \frac{V_{\text{ЭДП}} \cdot 24 \cdot 60}{T_{\text{ЭДП}}}, \text{ т/сут}, \quad (3)$$

где V_{ЭДП} – емкость электродуговой печи, т; 24·60 – число минут в сутках, T_{ЭДП} – период плавки в электродуговой печи (принято 50 мин).

Все расчеты носят оценочный характер, т. е. не учитываются простои, угар железа и другие факторы.

В табл. 3 приведены данные о времени плавки T_{КК} и производительности P_{КК} кислородных конвертеров различной емкости и соответствующие сквозные эмиссии CO₂ кислородных конвертеров, выбранных для анализа.

Суточная производительность кислородного конвертера P_{КК} определялась ориентировочно по соотношению

$$P_{\text{КК}} = \frac{V_{\text{КК}} \cdot 24 \cdot 60}{T_{\text{КК}}}, \quad (4)$$

где V_{КК} – емкость кислородного конвертера, т; 24·60 – число минут в сутках, T_{КК} – период плавки в кислородном конвертере, мин.

Дальнейшие расчеты (табл. 4) основаны на следующих условиях работы кислородного конвертера.

В электродуговую печь загружается 30 % (от массы металлической части шихты) чугуна, т. е.

$$m_{\text{чЭДП}} = 0,3 \cdot P_{\text{ЭДП}}. \quad (5)$$

Остальные 70 % дополняются металлически ломом.

В кислородный конвертер загружается часть чугуна (75 – 85 %), который остался после загрузки электродуговой печи, т. е.

$$m_{\text{чКК}} = P_{\text{ДП}} - N_{\text{ЭДП}} \cdot m_{\text{чЭДП}}, \quad (6)$$

где N_{ЭДП} – число электродуговых печей. До полной емкости кислородного конвертера загружается металлический лом.

Удельное значение углеродного следа CO₂ тандема ДП + ЭДП равно 1,4 т CO₂/т стали. Следовательно

Таблица 3

Данные о времени плавки, суточной производительности и сквозной эмиссии CO₂ кислородных конвертеров

Table 3. Data on time of smelting, daily productivity and through emission of CO₂ of oxygen converters

V _{КК} , т	T _{КК} , мин	P _{КК} , т/сут	Сквозная эмиссия CO ₂ , т/сут
160	45	5 120	11 090
200	45	7 400	13 862
300	45	9 600	20 794
400	45	12 800	27 725

Результаты расчетов сочетания ДП, ЭДП и КК

Table 4. Calculation results of combination of BF, EAF and OC

Емкость КК, т	ДП, т/сут	Сталь, т/сут	Чугун ЭДП, т/сут	Чугун КК, т/сут	Сквозная эмиссия CO ₂ ЭДП, т/сут	Сквозная эмиссия CO ₂ КК, т/сут	Сквозная эмиссия CO ₂ , т/сут	Сквозная эмиссия/Ст	Снижение сквозной эмиссии, %
Одна ЭДП 100									
200	7 400	12 160	1 728	5 672	8 064	15 177	23 241	1,91	11,77
300	8 100	12 480	864	7 236	4 032	19 739	23 771	1,90	12,07
400	10 800	15 680	864	9 936	4 032	27 004	31 036	1,98	8,63
Две ЭДП 100									
200	7 400	12 160	1 728	5 672	8 064	15 177	23 241	1,91	11,77
400	10 800	18 560	1 728	9 072	8 064	24 948	33 012	1,78	17,89
Три ЭДП 100									
200	7 400	15 040	2 592	4 808	12 096	13 121	25 217	1,68	22,60
200	8 100	15 040	2 592	5 508	12 096	14 787	26 883	1,79	17,48
300	10 800	18 240	2 592	8 208	12 096	22 052	34 148	1,87	13,57
Четыре ЭДП 100									
160	7 400	16 640	3 456	3 944	16 128	10 729	26 857	1,61	25,49
200	8 100	17 920	3 456	4 644	16 128	12 731	28 859	1,61	25,66
300	10 800	21 120	3 456	7 344	16 128	19 996	36 124	1,71	21,04
Одна ЭДП 150									
300	8 100	13 920	1 296	6 804	6 048	18 711	24 759	1,78	17,89
400	10 800	17 120	1 296	9 504	6 048	25 976	32 024	1,87	13,65
Две ЭДП 150									
200	7 400	15 040	2 592	4 808	12 096	13 121	25 217	1,68	22,60
200	8 100	15 040	2 592	5 508	12 096	14 787	26 883	1,79	17,48
300	10 800	18 240	2 592	8 208	12 096	22 052	34 148	1,87	13,57
Три ЭДП 150									
160	8 100	18 080	3 888	4 212	18 144	11 367	29 511	1,63	24,65
300	10 800	22 560	3 888	6 912	18 144	18 968	37 112	1,65	24,06
Четыре ЭДП 150									
200	10 800	23 680	5 184	5 616	24 192	15 044	39 236	1,66	23,51

$$CЭ_{ЭДП} = 1,4 m_{стЭДП} \quad (7)$$

Удельное значение сквозной эмиссии CO₂ тандема ДП + КК при 80 % чугуна равно 2,166 т CO₂/т стали. Удельное значение сквозной эмиссии CO₂ тандема ДП + КК при 75 % чугуна равно 2,048 т CO₂/т стали. Удельное значение сквозной эмиссии CO₂ тандема ДП + КК при 85 % чугуна равно 2,286 т CO₂/т стали. На 1 % чугуна в шихте кислородного конвертера добавляется

$$\frac{2,286 - 2,048}{10} \approx 0,0238 \text{ т CO}_2/\text{т стали.}$$

При любом содержании чугуна в шихте в пределах 75 – 85 % удельное значение сквозной эмиссии CO₂

$$m_{CO_2} = 2,166 - \left(80 - \frac{m_{чКК}}{V_{КК}} \right) \cdot 0,0238. \quad (8)$$

Следовательно при условии, что за базовый уровень приняты 80 % чугуна в шихте, сквозная эмиссия CO₂ кислородного конвертера составит

$$CЭ_{КК} = \left[2,166 - \left(80 - \frac{m_{чКК}}{V_{КК}} \right) \cdot 0,0238 \right] m_{стКК},$$

т CO₂/т стали.

Суммарная сквозная эмиссия СЭ на 1 т стали

$$CЭ = CЭ_{ЭДП} + CЭ_{КК}. \quad (9)$$

Отношения значений сквозных эмиссий комплекса ДП + КК + ЭДП к суммарному значению полученной стали $C_T = P_{ЭДП} + P_{КК}$

$$\beta = \frac{CЭ}{C_T} \quad (10)$$

является значением удельной сквозной эмиссии CO_2 комплекса ДП + КК + ЭДП.

Это отношение сравнивается со значением 2,166 – сквозной эмиссией CO_2 кислородного конвертера при 80 % чугуна в кислородном конвертере с целью определения снижения сквозной эмиссии по отношению к тандему ДП + КК.

Использование электродуговой печи емкостью 150 т приводит к улучшению этих параметров. Таким образом, применение комплексов ДП + КК + ЭДП целесообразно для уменьшения сквозной эмиссии CO_2 . В случае подогрева загружаемого металлического лома, в кислородном конвертере долю чугуна в шихте можно уменьшить до 70 %, что позволит снизить сквозную эмиссию CO_2 на 20 % при двух электродуговых печах.

Выводы. Одновременное применение кислородных конвертеров с электродуговыми печами позволяет снизить эмиссию диоксида углерода до 20 %. Это свидетельствует о том, что такая триада применяемых агрегатов соответствует зеленым технологиям.

Примером использования отмеченной триады является Магнитогорский металлургический комбинат, на котором, наряду с кислородным конвертером, применяются электродуговые печи с использованием производимой на предприятии электроэнергии. Такая практика может быть рекомендована для целого ряда других металлургических предприятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Киотский протокол. «Новая газета». № 72 от 8 июля 2009 г.
2. Выступления В. Путина на полях Всемирной конференции ООН по климату, прошедшей в Париже 30 ноября 2015 г. <http://www.vsesovetnik.ru/archives/8732>.
3. ГОСТ Р ИСО 14064-1-2007. Газы парниковые. Ч. 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и удалении парниковых газов на уровне организации. – М.: Стандартинформ, 2010. – 23 с.
4. Миллер Т. Жизнь в окружающей среде: Учебник для вузов. Т. 2: Пер. с англ. / Под ред. Г. А. Ягодина. – М.: Издательская группа «Прогресс-Пангея», 1980. – 256 с.
5. Миллер Т. Жизнь в окружающей среде: Учебник для вузов. Т. 3: Пер. с англ. / под ред. Г. А. Ягодина. – М.: Издательская группа «Прогресс-Пангея», 1993. – 400 с.
6. Удальцов А. Поезд надежды: экологические меридианы и параллели: Учеб. пособие для вузов. – М.: Политиздат, 1984. – 254 с.
7. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов: Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов (МГЭИК, 2006 г.) / Под ред. Х.С. Иглестон, Л. Буэндия, К. Мива и др. – Япония: ИГЕС, 2007.
8. Потапочкин А.Н., Симонян Л.М., Черноусов П.И., Косырев К.Л. Потребление углерода и выбросы CO_2 в черной металлургии: варианты оценки // Сталь. 2004. № 9. С. 69 – 72.
9. Шевелев Л.Н. Методические основы инвентаризации парниковых газов в черной металлургии России // Сталь. 2007. № 4. С. 97 – 102.
10. Шевелев Л.Н. Оценка выбросов парниковых газов в черной металлургии России // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2008. Вып. 8 (1304). С. 3 – 8.
11. Каленский И.В. Рекомендации по учету выбросов CO_2 на предприятиях черной металлургии // Сталь. 2007. № 5. С. 121 – 129.
12. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Математические модели косвенных оценок эмиссии CO_2 в некоторых металлургических процессах // Сталь. 2011. № 8. С. 74 – 77.
13. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Оценка углеродного следа при выплавке стали в электродуговой печи // Металлург. 2013. № 9. С. 34 – 37.
14. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Разработка графов эмиссии диоксида углерода металлургическими предприятиями // Металлург. 2012. № 12. С. 23 – 26.
15. Лисиенко В.Г., Лаптева А.В., Чесноков Ю.Н., Луговкин В.В. Сравнительная эмиссия парникового газа CO_2 в пределах черной металлургии // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 9. С. 625 – 629.
16. Гилева Л.Ю., Загайнов С.А. Балансовые методы расчета процессов получения чугуна: Учеб. пособие для вузов. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 77 с.
17. Проектирование и оборудование сталеплавильных цехов / В.М. Обухов, В.М. Шариков, Ю.А. Дерябин и др. – Екатеринбург, 2010. – 410 с.
18. Свинолобов Н.П., Бровкин В.Л. Печи черной металлургии: Учеб. пособие для вузов. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 154 с.
19. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа: Учебник для вузов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 464 с.
20. Процесс Ромелт: Учебник для вузов / В.А. Роменец, В.С. Валавин, А.Б. Усачев и др. / Под ред. В.А. Роменца. – М.: МИСиС, Издательский дом «Руда и металлы», 2005. – 400 с.
21. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушева А.М. Общая металлургия: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1998. – 768 с.
22. Загайнов С.А., Тлеугабдулов С.М., Михалев В.А., Кушнарев А.В. Пылеугольное топливо может успешно применяться в доменной плавке титаномagnetитов // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2014. № 3. С. 42 – 46.

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 8, pp. 623–628.

THE USE OF TRIAD OF BLAST FURNACE, OXYGEN CONVERTER AND ELECTRIC ARC FURNACE FOR CARBON FOOTPRINT REDUCTION

V.G. Lisienko, Yu.N. Chesnokov, A.V. Lapteva

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

Abstract. Carbon footprint is the mass of carbon formed in the full cycle of production of one or another kind of product. This carbon is included in greenhouse gases. Carbon monoxide and greenhouse gases (methane and carbon dioxide) are generated at the production of iron

and steel. Methane and carbon monoxide burn up to carbon dioxide by the realization of secondary energy resources. Therefore, the carbon footprint at the production of iron and steel is determined by weight of formed carbon dioxide. As the results of analysis of the production processes of iron and steel it was revealed that the tandem of blast furnace with electric arc furnace is characterized by a lower value of integrated through emissions of CO_2 than the tandem of blast furnace with an oxygen converter. It is proposed to process the cast iron, made by one blast furnace, at the same time in the oxygen converter and in

one or more electric arc furnaces. Moreover in the electric arc furnace is loaded 30 % of iron which are produced in blast furnace, and the remaining 70 % are complemented by metal scrap. In the oxygen converter the part of cast iron (75 – 85 %) is loaded, which are remained after loading in the arc furnace. The converter is applied by the metal scrap for full loading. Calculations of through emission of carbon dioxide for different triads of these units are made. The simultaneous use of oxygen converter with electric arc furnaces for cast iron smelting obtained from one blast furnace helps to reduce confidently the emission of carbon dioxide to 20 % as it follows from the calculations. This suggests that this triad of used units conforms to green technology. Example of the use of marked triad is for a full load of the converter is applied to metal scrap, the calculations through emissions of carbon dioxide for different triads of these units. From these calculations it follows that the simultaneous use of oxygen converters from electric arc furnaces for smelting iron, obtained from one blast furnace, it helps to reduce the emission of carbon dioxide to 20 %. This suggests that this triad used units conforms to green technology. An example of using the noted triad is the Magnitogorsk Iron and Steel Works, which, in addition to the oxygen converter, uses electric arc furnaces for smelting steel using electric power produced by the enterprise by burning fuel secondary energy resources from aggregates in which fuel is burnt. This practice can be recommended for a number of other metallurgical enterprises.

Keywords: emission of carbon dioxide, carbon footprint, cast iron, steel, blast furnace, oxygen converter, electric arc furnace.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-623-628

REFERENCES

1. *Kiotskii prokol* [Kyoto puncture]. *Novaya gazeta*, no. 72, July 8, 2009. (In Russ.).
2. *Vystupleniya Vladimira Putina na polyakh Vsemirnoi konferentsii OON po klimatu, proshedshei v Parizhe 30 noyabrya 2015 goda* [Vladimir Putin's performances on fields of the World conference of the UN on climate, Paris, November 30, 2015]. Available at URL: <http://www.vsesovetnik.ru/archives/8732>. (In Russ.).
3. *GOST R ISO 14064-1-2007. Gazy parnikovye. Ch. 1. Trebovaniya i rukovodstvo po kolichestvennomu opredeleniyu i otchetnosti o vybrosakh i udaleniі parnikovyykh gazov na urovne organizatsii* [GOST P ISO 14064-1-2007. Greenhouse gases. Part. 1. Requirements and the guide to quantitative definition and the reporting on emissions and removal of greenhouse gases at the level of the organization]. Moscow: Standartinform, 2010, 23 p. (In Russ.).
4. Miller G.Tyler. *Living in the Environment*. Belmont, Calif.: Wadsworth Publishing Company, 1979, 699 p. (Russ.ed.: Miller T. *Zhizn' v okruzhayushchei srede: ucheb. dlya vuzov. Vol. 2*. Yagodin G.A. ed. Moscow: Progress-Pangeya, 1980, 256 p.).
5. Miller G.Tyler. *Living in the Environment*. Belmont, Calif.: Wadsworth Publishing Company, 1979, 699 p. (Russ.ed.: Miller T. *Zhizn' v okruzhayushchei srede: ucheb. dlya vuzov. Vol. 3*. Yagodin G.A. ed. Moscow: Progress-Pangeya, 1993, 400 p.).
6. Udaltsov A. *Poezd nadezhdy: ekologicheskie meridiany i paralleli: ucheb. posobie dlya vuzov* [Train of hope: ecological meridians and parallels: Manual for universities]. Moscow: Politizdat, 1984, 254 p. (In Russ.).
7. *IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan, 2007.
8. Potapochkin A.N., Simonyan L.M., Chernousov P.I., Kosyrev K.L. Consumption of carbon and CO₂ emissions. *Stal'*. 2004, no. 9, pp. 69–72. (In Russ.).
9. Shevelev L.N. Methodical bases of inventory of greenhouse gases in ferrous metallurgy of Russia. *Stal'*. 2007, no. 4, pp. 97–102. (In Russ.).
10. Shevelev L.N. Assessment of emissions of greenhouse gases in ferrous metallurgy of Russia. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2008, no. 8 (1304), pp. 3–8. (In Russ.).
11. Kalenskii I.V. Recommendations about the accounting of CO₂ emissions at the enterprises of ferrous metallurgy. *Stal'*. 2007, no. 5, pp. 121–129. (In Russ.).
12. Chesnokov Yu.N., Lisienko V.G., Lapteva A.V. Mathematical models of indirect estimates of CO₂ emission in some metallurgical processes. *Stal'*. 2011, no. 8, pp. 74–77. (In Russ.).
13. Chesnokov Yu.N., Lisienko V.G., Lapteva A.V. Evaluating the carbon footprint from the production of steel in an electric-Arc furnace. *Metallurgist*. 2014, vol. 57, no. 9-10, pp. 774–778.
14. Chesnokov Yu.N., Lisienko V.G., Lapteva A.V. Graph model for carbon dioxide emissions from metallurgical plants. *Metallurgist*. 2013, vol. 56, no. 11-12, pp. 888–893.
15. Lisienko V.G., Lapteva A.V., Chesnokov Yu.N., Lugovkin V.V. Comparative emission of greenhouse gas CO₂ in the processing of ferrous metallurgy. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 9, pp. 625–629. (In Russ.).
16. Gileva L.Yu., Zagainov S.A. *Balansovye metody rascheta protsessov polucheniya chuguna: ucheb. posobie dlya vuzov* [Balance methods of calculation of processes of receiving cast iron: Manual for universities]. Ekaterinburg: UrFU, 2011, 77 p. (In Russ.).
17. Obukhov V.M., Sharikov V.M., Deryabin Yu.A., Spirin V.A., Chernavin S.B. *Proektirovanie i oborudovanie staleplavil'nykh tsekhov: monografiya* [Design and equipment of steel-smelting shops: Monograph]. Ekaterinburg, 2010, 410 p. (In Russ.).
18. Svinolobov N.P., Brovkin V.L. *Pechi chernoi metallurgii: ucheb. posobie dlya vuzov* [Furnaces of ferrous metallurgy: Manual for universities]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2004, 154 p. (In Russ.).
19. Yusfin Yu.S., Pashkov N.F. *Metallurgiya zheleza: ucheb. dlya vuzov* [Metallurgy of iron: Textbook for universities]. Moscow: IKTs "Akademkniga", 2007, 464 p. (In Russ.).
20. Romenets V.A., Valavin V.S., Usachev A.B. etc. *Protsess Romelt: ucheb. dlya vuzov* [Romelt process: Manual for universities]. Romenets V.A. ed. Moscow: MISiS, ID Ruda i metally, 2005, 400 p. (In Russ.).
21. Voskoboinikov V.G., Kudrin V.A., Yakushev A.M. *Obshchaya metallurgiya: ucheb. dlya vuzov* [General metallurgy: Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1998, 768 p. (In Russ.).
22. Zagainov S.A., Tleugabulov S.M., Mikhalev V.A., Kushnarev A.V. Coal-dust fuel can successfully be applied in blast-furnace melting of titanomagnetite. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2014, no. 3, pp. 42–46. (In Russ.).

Information about the authors:

V.G. Lisienko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Information Technologies and Automatics" (V.G.Lisienko@urfu.ru)

Yu.N. Chesnokov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Information Technologies and Automatics" (J.N.Chesnokov@urfu.ru)

A.V. Lapteva, Senior Lecturer of the Chair of Automatics (A.V.Lapteva@urfu.ru)

Received April 12, 2017