

УДК 669.162.27.003.1

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭМИССИЯ ПАРНИКОВОГО ГАЗА CO_2 В ПЕРЕДЕЛАХ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Лисиенко В.Г., д.т.н., профессор кафедры автоматики (lisienko@mail.ru)

Лаптева А.В., старший преподаватель кафедры автоматики

Чесноков Ю.Н., к.т.н., доцент кафедры автоматики

Луговкин В.В., к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Парниковый газ CO_2 образуется во всех технологических процессах черной металлургии. Выделены три типа эмиссий диоксида углерода различных переделов черной металлургии: процесса, транзитная и сквозная. Сквозная эмиссия диоксида углерода того или иного передела является суммой интегральных эмиссий процесса и транзитной. Предложена классификация переделов черной металлургии по механизму образования эмиссии диоксида углерода. Выделено пять типов переделов, к которым можно отнести нагревательные печи, конвертеры, мартеновские печи, доменные печи, коксовые батареи. Приведены значения сквозных эмиссий диоксида углерода для шести сочетаний переделов, на выходе которых получается сталь.

Ключевые слова: эмиссия, парниковый газ, диоксид углерода, передел, черная металлургия, граф, сквозная эмиссия.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-625-629

Парниковый газ CO_2 образуется во всех технологических процессах черной металлургии при сжигании органического топлива, выгорании углерода из полуфабриката, разложении составляющих флюсов. Другой парниковый газ, метан, входит в состав вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) и сгорает до диоксида углерода в процессе использования ВЭР. Таким образом, широко распространенное за рубежом понятие углеродного следа в черной металлургии можно свести к понятию интегральной сквозной эмиссии диоксида углерода M_C , которая является суммой эмиссий CO_2 , последовательно возникающих во всех процессах технологической цепи, начиная с добычи сырья и кончая тем продуктом, для которого эта эмиссия определяется – транзитных эмиссий. Сквозная эмиссия CO_2 того или иного передела является суммой интегральных эмиссий CO_2 процесса M_{Π} и транзитной M_T :

$$M_C = M_{\Pi} + M_T. \quad (2.3)$$

Транзитная эмиссия определяет долю от суммарной массы эмиссии диоксида углерода, образованного в предыдущих процессах.

Различные технологические схемы характеризуются разными объемами образования диоксида углерода. Эмиссии диоксида углерода посвящено много работ [1 – 6], однако требуются дополнения и уточнения при сравнительной оценке различных переделов черной металлургии по эмиссии диоксида углерода.

В реальных процессах диоксид углерода в продуктах сгорания присутствует вместе с оксидом углерода. Например, доменный газ содержит 25 – 27 % CO и 16 – 23 % CO_2 в зависимости от содержания кислорода в дутье. Часть CO используется непосредственно в доменном процессе – окисляется в воздушнонагревателях до CO_2 . Но большая часть сгорает в котлах местных электростанций, обеспечивая до 90 % электроэнергии, потребляемой металлургическими предприятиями, а в простейшем случае CO сжигается в факелах или дожигается в специальных устройствах. Таким образом, массу CO_2 , образующегося в доменном, коксохимическом, электродуговом, мартеновском процессах определим с учетом дожигания CO по суммарной массе углерода, содержащегося в соответствующих топливах. В этой связи всю массу диоксида углерода, полученного от сгорания топлива в доменной печи, в воздушнонагревателях, в котлах местных электростанций отнесем к доменной печи, т. е. к чугуно. По этой причине эмиссии M_{Π} , M_T , M_C названы интегральными.

Понятие интегральной эмиссии можно пояснить материальными потоками вторичных энергетических ресурсов металлургического комбината (рис. 1). На входе рассматриваются уголь, природный газ и известняк. Все ВЭР используются внутри комбината. Следовательно итоговая или интегральная эмиссии диоксида углерода определяются количеством углерода, поступившим с углем и природным газом, а также количеством разложившегося известняка в агломерационном процессе. Изменим схему потоков ВЭР, пред-

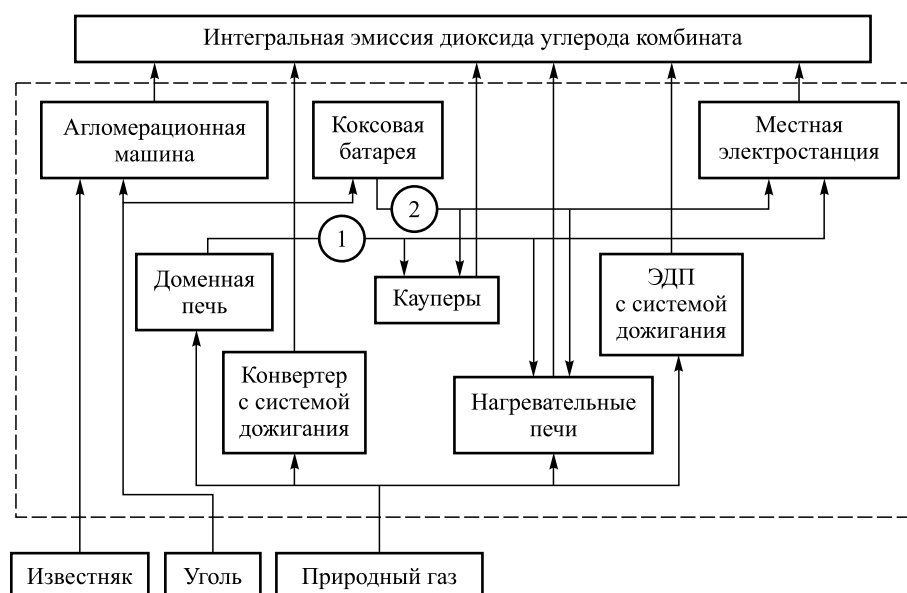


Рис. 1. Образование интегральной эмиссии диоксида углерода металлургического комбината:
1 – доменный газ; 2 – коксовый газ

Fig. 1. Formation of integrated emission of carbon dioxide of metallurgical plant:
1 – blast furnace gas; 2 – coke gas

полагая, что все они используются в самом процессе, например через местную электростанцию (рис. 2). При этом, для исключения двойного счета, потоки ВЭР, например на нагревательные печи, коксовые батареи, кауперы и другие агрегаты из схемы удалены. На рис. 2 итоговые эмиссии диоксида углерода тем или иным агрегатом обозначены CO_2^i . Сумма CO_2^i при i от 1 до 6 равна итоговой эмиссии комбината, т.е. сумме эмиссий

агрегатов, показанных на рис. 1. В этом случае интегральную эмиссию процесса M_{II} можно определить по количеству полностью сгоревшего углерода в процессе при допущении того, что все топливные ВЭР сгорают прямо или косвенно в этом же процессе. Такой подход повышает точность оценки эмиссии диоксида углерода и упрощает методику сравнения различных переделов по этому показателю. Для предотвращения двойного

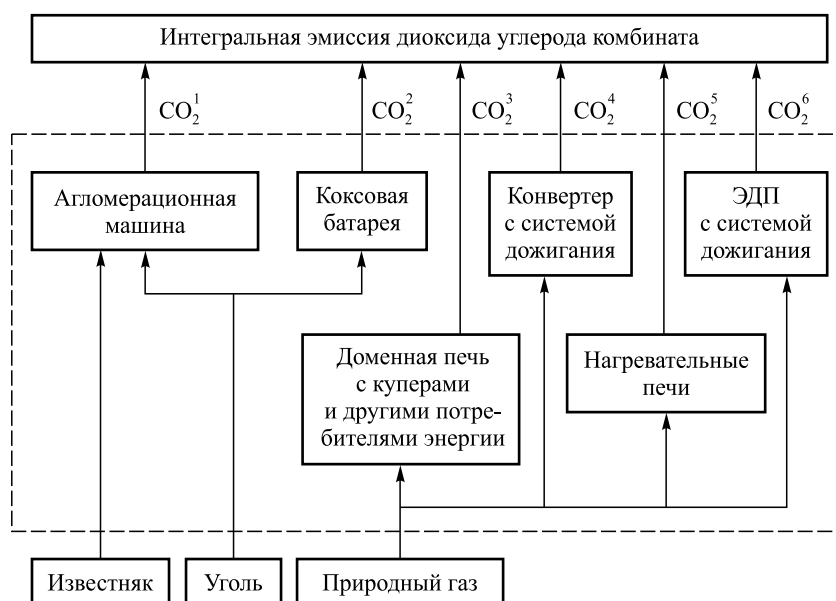


Рис. 2. Образование интегральной эмиссии диоксида углерода металлургического комбината с допущением использования всех ВЭР в самом процессе

Fig. 2. Formation of integrated emission of carbon dioxide of metallurgical plant with assuming in the process of the use of all secondary power resources

счета исключаем учет использования ВЭР, полученных в анализируемом и в других процессах.

При таком подходе можно выделить пять типов металлургических переделов по механизму образования диоксида углерода.

Tun 1. Процессы, в которых сжигается топливо. К таким процессам относятся агломерационные машины, обжиговые печи железорудных окатышей, нагревательные печи прокатного производства, процессы термической обработки, парогенераторы электростанций. В агломерационном процессе используется известняк. Эмиссия CO_2 при его разложении вычисляется отдельно и суммируется с эмиссией диоксида углерода, полученной от сгорания углерода.

Tun 2. Процессы, в которых выгорает углерод из металла шихты, но топливо не используется. Это все виды конвертерного производства и в том числе кислородно-конвертерного с дожиганием оксида углерода в конвертере или в факеле.

Tun 3. Процессы, в которых выгорает углерод из металла шихты и сжигается топливо. К таким процессам можно отнести мартеновское производство.

Tun 4. Процессы, в которых сжигается топливо и часть углерода переходит в конечный продукт. Прежде всего, это доменный процесс. Кроме того, к этому типу процессов относятся все бескоксковые технологии (HyL-3, Midrex, COREX, POMELIT). Доменный газ содержит много оксида углерода и используется как топливо для воздуходогревателей доменной печи. Однако значительное количество доменного газа не используется в воздуходогревателях. Эта часть его используется для выработки электроэнергии, которая служит для получения кислорода, воды на охлаждение, воздушного дутья.

Tun 5. Процессы, в которых происходит возгонка летучих фракций топлива, используемых как топливо в этих же процессах. К ним отнесем коксование. В этом процессе сжигается топливо для прогрева коксовых батарей. Этим топливом является коксовый, доменный газ или их смесь и образование диоксида углерода в них вычисляется в соответствующем типе технологических процессов. Выделенный углерод в процессе возгонки в составе угарного газа дожигается при использовании коксового газа в качестве топлива. Избыток коксового газа сжигается в факелах коксовых батарей или в котлах местных электростанций. Таким образом, весь углерод, полученный в результате возгонки, образует диоксид углерода. Если для обогрева коксовых батарей используется природный газ, то такое коксование следует отнести к новому типу технологических процессов, который здесь не рассматривается из-за его неэффективности.

Для каждого типа найдены формулы для вычисления значения интегральной эмиссии диоксида углерода [7].

Значение сквозной интегральной эмиссии передела можно определить, используя графовую модель эмиссий (рис. 3). Вершины этого ориентированного графа соответствуют процессу или ресурсу [8]. В скобках ука-

заны значения эмиссий: сквозной, если имеется одно число, или процесса и через дробную черту сквозной, если указаны два числа. Каждой дуге поставлено в соответствие число – вес, равный расходу того или иного ресурса. Для исключения двойного счета эмиссий диоксида углерода при их расчете в доменном процессе исключены эмиссии от электроэнергии, например для получения кислорода, обеспечения дутья и т.п. (в скобках проставлены нули).

В общем виде будет справедлива следующая формула для вычисления значения сквозной эмиссии в той или иной вершине

$$M_{Cik} = M_{\Pi ik} + \sum_{i=1}^L \left(G_{ik} \sum_{j=1}^N P_{jk} \right) + \sum_{l=1}^M \left(M_{\Pi il} \sum_{j=1}^P P_{jl} \right),$$

где L – число источников (вершин графа, из которых дуги только выходят); N – число путей из вершины-источника к анализируемой вершине; P_{jk} – передачи соответствующего пути – произведения весов дуг, например, $\Psi_{11} \Psi_{31} \Psi_{51} \Psi_{71}$; M – число вершин, соответствующих процессам, у которых эмиссия процесса не равна нулю; P – число путей из таких вершин к анализируемой вершине.

Длина путей различна. Здесь индекс i соответствует номеру передела в технологической цепи, а индекс k означает эмиссию диоксида углерода от k -го источника в i -м переделе, l – номер вершины в i -м переделе, у которой эмиссия процесса не равна нулю.

Приведем пример оценки интегральной эмиссии M_{Π} доменной печи при расходе кокса 0,323 т/т чугуна или 0,275 т углерода, природного газа – 61 м³/т чугуна или 0,033 т углерода, пылеугольного топлива – 0,13 т/т чугуна или 0,093 т углерода по суммарной массе окисленного углерода: $0,275 + 0,033 + 0,093 = 0,401$ т/т чугуна. Газ CO_2 из этого углерода получится 1320 т или 667,7 м³/т чугуна. Такая итоговая масса диоксида углерода образуется в самом доменном процессе и в процессах по реализации ВЭР – доменного газа.

Можно значения сквозных эмиссий считать по частям. Например для доменной печи найдем

$$M_C = 1320 + 197 \cdot 0,6 + 417 \cdot 1,0 + 429,7 \cdot 0,323 + + 30 \cdot 0,13 + 0,234 \cdot 61 = 2036 \text{ кг/т чугуна.}$$

Предложенная трактовка эмиссий диоксида углерода позволила провести сравнение сочетаний переделов черной металлургии, на выходе которых получается сталь (см. таблицу).

Выводы. Эмиссия парникового газа CO_2 разделена на три типа: процесса, транзитная и сквозная.

Предложены типы переделов в черной металлургии в зависимости от механизма образования эмиссии диоксида углерода.

Даны сравнительные результаты расчетов эмиссии CO_2 для различных процессов черной металлургии.

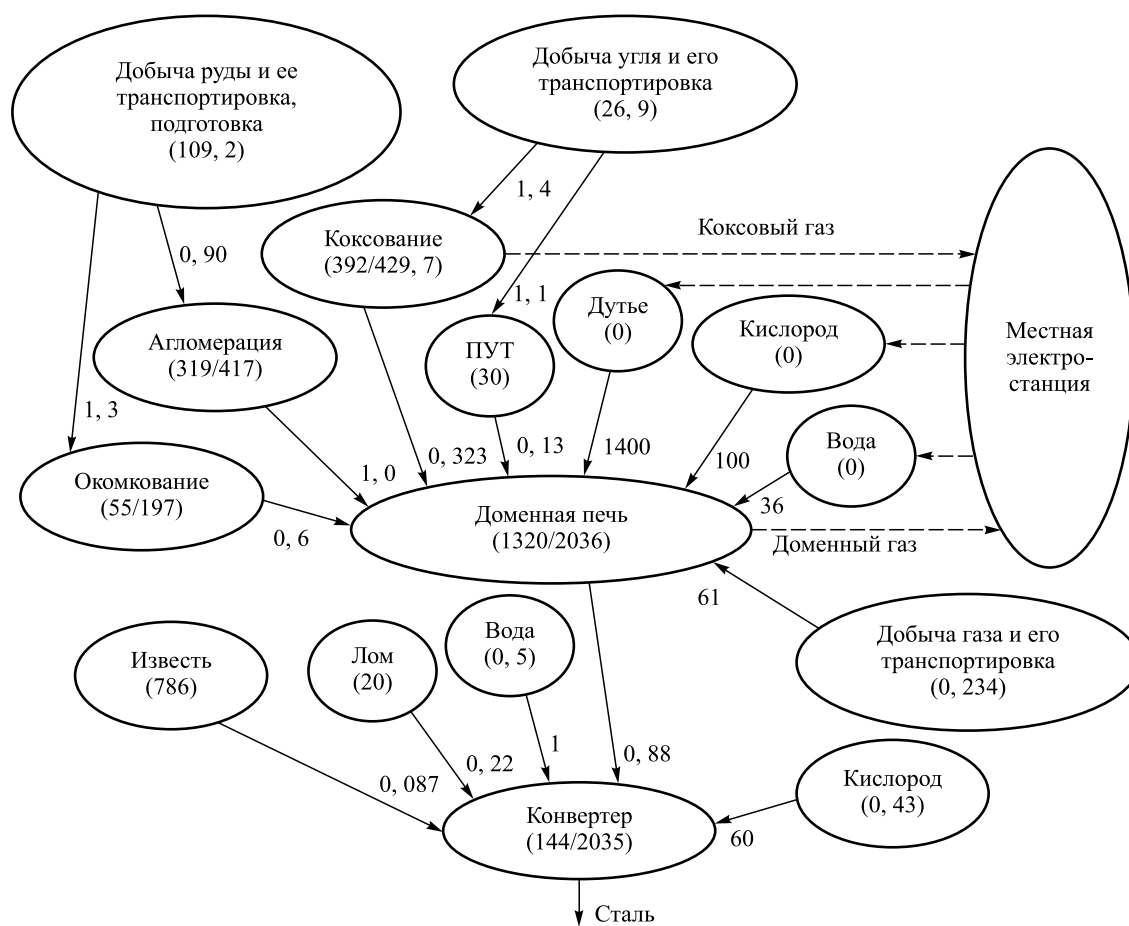


Рис. 3. Граф эмиссий диоксида углерода аглодоменного производства с вдуванием природного газа и пылеугольного топлива

Fig. 3. Graph of carbon dioxide emissions of sintering and blast furnace production with injection of natural gas and powdered coal

Значения эмиссий диоксида углерода в различных сочетаниях металлургических переделов производства стали

The emissions of carbon dioxide in various combinations of metallurgical processes of steel production

Процесс	Эмиссия на 1 т продукции		Ранг процесса по эмиссии CO ₂
	сквозная, кг	объемная, м ³	
HyL-3 + ЭДП ¹	1125	569	1
Midrex + ЭДП	1224	619	2
ДП ² + ЭДП	1365	690	3
РОМЕЛТ + ЭДП	2004	1015	4
COREX + ЭДП	2018	1021	5
ДП + конвертер	2120	1072	6

¹ ЭДП – электродуговая печь;

² ДП – доменная печь без вдувания пылеугольного топлива.

¹ ЭДП – electric arc furnace;

² ДП – blast furnace without a pulverized coal injection.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Потапочкин А.Н., Симонян Л.М., Черноусов П.И., Косырев К.Л. Потребление углерода и выбросы CO₂ в черной металлургии: варианты оценки // Сталь. 2004. № 9. С. 69 – 72.
2. Шевелев Л.Н. Методические основы инвентаризации парниковых газов в черной металлургии России // Сталь. 2007. № 4. С. 97 – 102.
3. Шевелев Л.Н. Оценка выбросов парниковых газов в черной металлургии России // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2008. № 8. С. 3 – 8.
4. Каленский И.В. Рекомендации по учету выбросов CO₂ на предприятиях черной металлургии // Сталь. 2007. № 5. С. 121 – 129.
5. Казаков Р.А., Зволинский В.П., Черноусов П.И. Совершенствование методологических подходов к комплексной оценке выбросов парниковых газов в черной металлургии // Металлург. 2011. № 12. С. 27 – 31.
6. Казаков Р.А. Исследование возможности повышения энергетической эффективности и сокращения выбросов парниковых газов на предприятиях черной металлургии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2013. – 27 с.
7. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Математические модели косвенных оценок эмиссии CO₂ в некоторых металлургических процессах // Сталь. 2011. № 8. С. 74 – 77.
8. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Разработка графов эмиссии диоксида углерода металлургическими предприятиями // Металлург. 2012. № 12. С. 23 – 26.

Поступила 10 апреля 2015 г.

COMPARATIVE EMISSION OF GREENHOUSE GAS CO₂ IN THE PROCESSING OF FERROUS METALLURGY

Lisienko V.G., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Automatics” (lisienko@mail.ru)

Lapteva A.V., Senior Lecturer of the Chair “Automatics”

Chesnokov Yu.N., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Automatics”

Lugovkin V.V., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

Abstract. Carbon dioxide – a greenhouse gas – is formed in all industrial processes of iron and steel industry. We can identify three types of emissions of carbon dioxide of ferrous metallurgy processing: process, transit and through. Through emission of carbon dioxide of different processing is the sum of the integral emission of carbon dioxide of the process and transit. A classification of the processing in the iron industry on the mechanism of formation of carbon dioxide emissions is proposed. The authors have identified five types of processing, which include redistributions, respectively, heating furnace, converters, open-hearth furnaces, blast furnaces and coke batteries. The values of cross-cutting carbon dioxide emissions for the six combinations of steel production stages are presented.

Keywords: emission, greenhouse gas, carbon dioxide, processing, ferrous metallurgy, graph, cross-cutting emission.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-625-629

REFERENCES

1. 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.).
2. Shevelev L.N. Methodical bases of an inventory of greenhouse gases in the Russian steel industry. *Stal'*. 2007, no. 4, pp. 97–102. (In Russ.).
3. Shevelev L.N. Evaluation of greenhouse gases in the Russian steel industry. *Byull. "Chernaya metallurgiya"*. Moscow: OAO "Chermetinformatsiya". 2008, Issue 8 (1304), pp. 3–8. (In Russ.).
4. Kalenskii I.V. Recommendations on account of CO₂ emissions at the enterprises of ferrous metallurgy. *Stal'*. 2007, no. 5, pp. 121–129. (In Russ.).
5. Kazakov R.A., Zvolinskii V.P., Chernousov P.I. Improving methodological approaches to the systematic evaluation of greenhouse-gas emissions in ferrous metallurgy. *Metallurgist*. 2012, vol. 55, no. 11–12, pp. 867–872.
6. Kazakov R.A. *Issledovanie vozmozhnosti povysheniya energeticheskoi effektivnosti i sokrashcheniya vybrosov parnikovykh gazov na predpriyatiyakh chernoi metallurgii: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Possibility of increasing energy efficiency and reducing greenhouse gas emissions at the enterprises of ferrous metallurgy: Cand. Sci. diss.]. Moscow: 2013. 27 p. (In Russ.).
7. Chesnokov Yu.N., Lisienko V.G., Lapteva A.V. Mathematical models of indirect estimates of CO₂ emissions in some metallurgical processes. *Stal'*. 2011, no. 8, pp. 74–77. (In Russ.).
8. 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.

Received April 10, 2015