

tensifying the heating of metal // Refractories and Industrial Ceramics. 2013. Vol. 54, No 3. P. 188–195.

11. Расчет эмиссии оксидов азота при сжигании природного газа в промышленных горелочных устройствах // Сталь. 2002. № 2. С. 91–96 / Г. К. Маликов, В. Г. Лисиенко, К. Ю. Маликов, Е. М. Шлеймович.

12. Учет начального загрязнения поступающего атмосферного воздуха в расчете вентиляции шахт // Безопасность труда в промышленности. 2005. № 10. С. 22–24 / А. Н. Кравченко, Ю. К. Маликов, А. Л. Мысляков, В. В. Токмаков.

13. Гигиеническая оценка использования прямого подогрева воздуха, подаваемого в шахту // Гигиена и санитария. 2011. № 4. С. 41–45 / Б. Т. Величковский [и др.]

УДК 669.18

В. Г. Лисиенко, А. В. Лаптева, Ю. Н. Чесноков

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РтФ,

кафедра «Автоматика», г. Екатеринбург, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ЭНЕРГО ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ (ПАРНИКОВЫЙ) АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ

Аннотация

Приведены результаты сравнительных расчетов энергоемкости и эмиссии диоксида углерода – парникового газа – в цепочках металлургических переделов при производстве стали.

Ключевые слова: производство стали, парниковый газ; диоксид углерода; технологическое топливное число; технологическое парниковое число.

Abstract

The results of comparative calculations of energy consumption and emission of carbon dioxide - a greenhouse gas - in the chains of metallurgical manufactories of steel production are sited.

В настоящее время в связи с резким изменением климатической обстановки на планете и борьбой мирового сообщества с парниковым эффектом целесообразно проведение и сопоставление оценки процессов и производств черной металлургии как с позиций эмиссии парниковых газов – по так называемому «углеродному следу», так и с позиций сквозной энергоемкости.

В процессах черной металлургии в основном образуются два парниковых газа: метан CH_4 и диоксид углерода CO_2 . Метан сопутствует добыче сырья для металлургических предприятий, выделяясь из горных пород. Его объемы не зависят от технологических процессов и носят случайный характер. Метан, образующийся в технологических процессах, сгорает в составе вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), образуя воду и диоксид углерода. Доля

неокисленного метана, уходящего в атмосферу, например при подъеме загрузочных устройств доменных печей, мала, и ею можно пренебречь. Диоксид углерода образуется во всех технологических процессах металлургии при сжигании органического топлива, выгорании углерода из полуфабриката, разложении составляющих флюсов. Причем различные технологические схемы характеризуются разными объемами образования диоксида углерода. По этой причине понятие углеродного следа представим в расширенной трактовке и сведем к интегральной сквозной эмиссии диоксида углерода M_C . Сквозной эмиссия названа по той причине, что она является суммой эмиссий CO_2 , которые последовательно возникают во всех процессах технологической цепи, начиная с добычи сырья и кончая тем продуктом, для которого эта эмиссия определяется. Она является суммой интегральных эмиссий CO_2 процесса МП и транзитной МТ:

$$M_C = M_{\Pi} + M_T. \quad (1)$$

Транзитная эмиссия определяет долю от суммарной массы эмиссии диоксида углерода, образованного в предыдущих процессах. Интегральная (итоговая) эмиссия процесса МП определяется по количеству полностью сгоревшего углерода непосредственно в процессе и при окислении ВЭР, полученных в этом же процессе, т. е. по количеству исходной массы углерода. При таком подходе нет необходимости анализировать фактический состав продуктов сгорания на выходе агрегата, так как при окислении ВЭР оксид углерода и метан продуктов сгорания перейдут в диоксид углерода. В этой связи вся масса диоксида углерода, полученного, например, от сгорания топлива в доменной печи, доменного газа в воздухонагревателях, в котлах местных электростанций отнесена к доменной печи. Для исключения двойного счета в рамках металлургического предприятия исключены оценки эмиссии диоксида углерода от сгорания ВЭР в процессах, в которых они не образуются. Например, вариант сжигания доменного газа в коксовых батареях из анализа исключается, так как считается, что весь доменный газ реализуется прямо или косвенно в доменном процессе, что отражено в интегральной эмиссии диоксида углерода этого процесса. Для исключения двойного счета эмиссии диоксида углерода при расчете сквозной эмиссии в доменном процессе исключены эмиссии от электроэнергии, например, для получения кислорода, обеспечения дутья и т. п. Методы и формулы определения сквозных интегральных эмиссий в различных технологических процессах черной металлургии приведены в литературе [1; 3]. Значения сквозных эмиссий CO_2 того или иного процесса зависят от многих факторов. В данной статье приведены величины, рассчитанные для усредненных значений расходов материалов и ресурсов, используемых в том или ином технологическом процессе.

Для оценки ущерба от выбросов парниковых газов продукции предложено этот ущерб выражать в энергетических единицах, что дает возможность сопоставлять энергоемкость продукции рассматриваемых производств с оцененным ущербом от выбросов парниковых газов. По аналогии с технологическими топливным и экологическим числами (ТТЧ и ТЭЧ) [5] введено понятие технологического парникового числа (ТПЧ) для процесса:

$$ТПЧ_i = K_B \sum_{k=1}^N M_k, \quad (2)$$

где M_k – фактическая удельная масса выбросов парниковых газов k -го загрязняющего вещества, т выбр/т прод., для i -го передела; K_B – коэффициент перевода стоимостной оценки ущерба к оценке в условных энергетических единицах (кг у.т. /т п.г.). Если принять в каче-

стве топлива природный газ и его цену («газовый» эквивалент), K_v представляется в виде

$$K_v = \frac{C_{в.в}}{C_{пр.г}} \frac{Q_{н.пр.г}^p}{Q_{н.у.т}^p}, \quad (3)$$

где $C_{в.в}$ – расчетная плата природопользователя (предприятий, учреждений, организаций) за загрязнение окружающей среды выбросами в атмосферу парниковых газов (принято значение 50 долл. США или 1500 руб/т п.г.); $C_{пр.г}$ – цена природного газа (принято на уровне 350 долл. США за 1000 м³ или 0,35 долл. США за 1 м³, $C_{пр.г} = 10,5$ руб. за 1 м³); $Q_{н.пр.г}^p$ – низшая рабочая теплота сгорания природного газа (35,8 МДж/м³); $Q_{н.у.т}^p$ – низшая рабочая теплота сгорания условного топлива (29,3 МДж/кг у.т.).

С учетом принятых значений параметров по формуле (3) получаем

$$K_v = \frac{0,05 \text{ долл./кг п.г.}}{0,35 \text{ долл./м}^3} \cdot \frac{35,8 \text{ МДж/м}^3}{29,3 \text{ МДж/кг у.т.}} = 0,1745 \text{ кг у.т./кг п.г.}$$

Величина K_v характеризует степень компенсации экологического ущерба при действующем соотношении цен на условное топливо и платы предприятия за выбросы парниковых газов. В условиях рыночной экономики цена на топливо может изменяться, при этом плата за выбросы парниковых газов, возможно, изменяется синхронно. Следовательно, K_v является условным расчетным коэффициентом, характеризующим соотношение этих экономических оценок и, естественно, подлежит корректировке при изменении этих оценок. Таким образом, величина ТПЧ – это количество килограммов условного топлива, требуемого для погашения стоимости экономического ущерба от выбросов парниковых газов на единицу выпускаемой продукции.

Были исследованы совокупности металлургических переделов, на выходе которых один и тот же продукт – сталь. В настоящее время сталь выплавляется в электродуговых печах (ЭДП) или в кислородных конверторах. Для этих агрегатов используются следующие шихтовые материалы: чугуны (доменная печь (ДП) [3], Corex [6], Ромелт [5]), железный лом (ЭДП), губчатое железо (Midrex [5], Hyl-3 [7]), металлизированные окатыши (легирование прямое ванадием или ЛП-В). В скобках указаны названия технологий, используемых в соответствующих переделах. В зависимости от процесса получения этих материалов были проанализированы следующие цепочки технологий (переделов): ДП + кислородный конвертер; ДП + ЭДП; Corex + ЭДП; Ромелт + ЭДП; Midrex + ЭДП; Hyl-3 + ЭДП; ЛП-В; ЭДП на ломе.

Для оценки интегральной эмиссии диоксида углерода следует рассматривать совокупную работу всех агрегатов с реализацией ВЭР, например экспортного газа ЛП-В, в этом же процессе для выработки электроэнергии. Эмиссии диоксида углерода процессов в ЭДП рассчитываются по моделям, приведенным в [1]. Причем при расчетах учитывалось только выгорание углерода из шихты (М.О. С = 1,7 %; лом С = 0,12 %; чугун С = 4 %; сталь С = 0,3 %) и 5 кг электродов с С = 100 %. Методики расчета эмиссий CO₂ для различных цепей переделов приведены в литературе [6–8]. Для данной работы значения эмиссий были пересчитаны для сравнимых условий (например, расход электроэнергии в ЭДП при работе на ломе принят 500 кВт·ч/т стали). Вместе с тем следует учесть, что с ростом доли жидкого чугуна в ЭДП снижается и расход электроэнергии [9]. Так, при доле чугуна 30 % в шихте расход электроэнергии снижается на 130 кВт·ч, а при доле чугуна 40 % – на 160 кВт·ч.

В табл. 1 и 2 приведены расходы сырьевых ресурсов. Результаты расчетов приведены в табл. 3. В табл. 4 технологические цепи расположены по увеличению значений ТТЧ. Как видим, в тройку наиболее приоритетных процессов по значению ТТЧ входят переделы ЭДП на ломе, ЛП-В, НуL-3 + ЭДП. По суммарному показателю ТТЧ + ТПЧ приоритетными оказались другие переделы: ЭДП на ломе, НуL-3 + ЭДП, Midrex + ЭДП.

Таблица 1

Расчетные данные по определению ТТЧ и ТПЧ

Сырьевые ресурсы и основные показатели	ТТЧ, кг у.т./ед.	Расходы на т продукции					
		ДП + конвертер		ДП + ЭДП		Midrex + ЭДП	
		ДП	конвертер	ДП	ЭДП	Midrex	ЭДП
Кокс, т	1396,0	0,40		0,40			
Коксик, т	1000,0				0,005		0,005
Природный газ, м ³	1,34	134,00		134,00	18,00	342,00	18,00
Азот, м ³	0,082				0,47		0,47
Аргон, м ³	0,845				0,75		0,75
Вода, м ³	0,120	36,0	1,00	36,0	15,00	2,00	15,00
Компрессорный воздух, м ³	0,0087				81,00		81,00
Дутье (подогрев), м ³	0,104	1400,0		1400,0			
Кислород, м ³	0,240	100,00	60,00	100,00	45,00		45,00
Электроэнергия, кВт ч	0,390	22,0		22,0	370,0	115,0	500,0
Агломерат, т	111,00	1,00		1,00			
Алюминий, т	5362,00				0,002		0,002
Губчатое железо т	см. расчет						0,330
Заправочные материалы, т	490				0,004		0,004
Известь, т	283,00	0,070	0,087	0,070	0,058		0,058
Известняк, т	33,00						
Лом, т	7,30		0,220		0,77		0,77
Оборудование и сооружения, ТАЧ	1,00	55,3	50,0	55,3	50,0	122,8	50,0
Огнеупоры на ремонт печи, т	500,00		0,005		0,007		0,007
Окатыши офлюсованные, т	123,00	0,6		0,6		1,4	
Ферромарганец, т	1033,0				0,003		0,003
Ферросилиций, т	2573,0				0,004		0,004
Чугун, т	см. расчет		0,880		0,330		
Электроды, т	7200,0				0,005		0,005
Губчатое железо, ТТЧ	<u>расчет</u>					798,37	
Чугун, ТТЧ	<u>расчет</u>	946		946			
Доменный газ, м ³	0,117	-2000		-2000			
Сталь, ТТЧ	<u>расчет</u>		926,1		637,3		639,2

Сырьевые ресурсы и основные показатели	ТТЧ, кг у.т./ед.	Расходы на т продукции					
		ДП + конвертер		ДП + ЭДП		Midrex + ЭДП	
		ДП	конвертер	ДП	ЭДП	Midrex	ЭДП
Эмиссия диоксида углерода (Э), кг			2307		1434		1224
ТПЧ			402,6		251,0		214,2
ТТЧ + ТПЧ			1328,7		888,3		826,5
Э/ТТЧ, кг CO ₂ /кг у.т.			2,49		2,25		1,92

Таблица 2

Расчетные данные по определению ТТЧ и ТПЧ

Сырьевые ресурсы и основные показатели	ТТЧ, кг у.т./ед.	Расходы на т продукции					
		HyL-3 + ЭДП		Ромелт + ЭДП		Corex + ЭДП	
		HyL	ЭДП	Ромелт	ЭДП	Corex	ЭДП
Коксик, т	1000,0		0,005		0,005		0,005
Природный газ, м ³	1,34	334,00	18,00		18,00		18,00
Уголь, т	962,00			1,20		1,05	
Азот, м ³	0,082		0,47		0,47	20	0,47
Аргон, м ³	0,845		0,75		0,75		0,75
Вода, м ³	0,120	2,00	15,00	7,00	15,00	1,50	15,00
Компрессорный воздух, м ³	0,0087		81,00	300	81,00		81,00
Кислород, м ³	0,240	50,00	45,00	900,00	45,00	550,00	45,00
Электроэнергия, кВт ч	0,390	70,0	500,0	-1200	370,0	75,0	370,0
Агломерат, т	111,00						
Алюминий, т	5362,00		0,002		0,002		0,002
Губчатое железо т	см. расчет		0,330				
Заправочные материалы, т	490		0,004		0,004		0,004
Известь, т	283,00		0,058	0,170	0,058	0,445	0,058
Известняк, т	33,00					0,112	
Лом, т	7,30		0,77		0,77		0,77
Оборудование и сооружения, ТАЧ	1,00	153,5	50,0	66,5	50,0	163,7	50,0
Огнеупоры на ремонт печи, т	500,00		0,007		0,007	0,0015	0,007
Окатыши офлюсованные, т	123,00	1					
Руда, т	39,00	0,46		1,46		1,50	

Сырьевые ресурсы и основные показатели	ТТЧ, кг у.т./ед.	Расходы на т продукции					
		HyL-3 + ЭДП		Ромелт + ЭДП		Corex + ЭДП	
		HyL	ЭДП	Ромелт	ЭДП	Corex	ЭДП
Транспорт	2,00						
Ферромарганец, т	1033,0		0,003		0,003		0,003
Ферросилиций, т	2573,0		0,004		0,004		0,004
Чугун, т	см. расчет				0,330		0,330
Электроды, т	7200,0		0,005		0,005		0,005
Губчатое железо, ТТЧ	<u>расчет</u>	769,5					
Чугун, ТТЧ	<u>расчет</u>			1078		931	
ВЭР, м ³	0,223					-2666	
Сталь, ТТЧ	<u>расчет</u>		629,7		680,6		632,3
Эмиссия диоксида углерода (Э), кг			1125		2004		2018
ТПЧ			169,9		350,7		353,2
ТТЧ+ТПЧ			826,5		1031,3		1021,1
Э/ТТЧ, кг CO ₂ /кг у.т.			1,79		2,95		3,19

Таблица 3

Ранжирование процессов производства стали по ТТЧ

№ процесса	Обозначение технологической цепи	ТТЧ стали, кг у.т. / т	Эмиссия CO ₂ , кг / т	ТПЧ, кг у.т. / т	ТТЧ + ТПЧ, кг у.т. / т
1	ДП + конвертер	926,1	2307	403,7	1329,8
2	Ромелт + ЭДП	680,6	2006	351,1	1031,3
3	Midrex + ЭДП	639,2	1224	214,2	853,4
4	ДП + ЭДП	637,3	1434	251,0	888,3
5	Corex + ЭДП	632,3	2018	353,2	985,5
6	HyL-3 + ЭДП	629,7	1125	196,9	826,5
7	ЛП-В	590,1	1567	274,2	864,3
8	ЭДП на ломе	415,5	482	84,4	499,8

Таблица 4

Ранжирование переделов по ТТЧ, ТПЧ и ТТЧ+ТПЧ

№ ранга	Ранжирование по ТТЧ	Ранжирование по ТПЧ	Ранжирование по ТТЧ и ТПЧ
1	ЭДП на ломе	ЭДП на ломе	ЭДП на ломе
2	ЛП-В	HyL-3 + ЭДП	HyL-3 + ЭДП
3	HyL-3 + ЭДП	Midrex + ЭДП	Midrex + ЭДП

№ ран-га	Ранжирование по ТТЧ	Ранжирование по ТПЧ	Ранжирование по ТТЧ и ТПЧ
4	Corex + ЭДП	ДП + ЭДП	ЛП-В
5	ДП + ЭДП	ЛП-В	ДП + ЭДП
6	Midrex + ЭДП	Ромелт + ЭДП	Corex + ЭДП
7	Ромелт + ЭДП	Corex + ЭДП	Ромелт + ЭДП
8	ДП + конвертер	ДП + конвертер	ДП + конвертер

Выводы

1. Для сравнительной оценки технологических процессов в рамках энерго-экологического анализа рассмотрена как энергоемкость, так и параметр эмиссии парниковых газов – технологическое парниковое число (ТПЧ).

2. Дана оценка энергоемкости и сквозной эмиссии диоксида углерода при производстве стали для процессов с использованием аглодоменного производства и ряда бескоковых металлургических процессов: твердофазных с получением металлизированных, в том числе ванадийсодержащих, окатышей, жидкофазных с получением чугуна и последующего получения стали в ЭДП или в конвертере. При производстве стали выявлены преимущества по энергоемкости и эмиссии CO₂ при использовании лома в ЭДП, процесса ЛП-В, а также процессов Нул-3 + ЭДП, Midrex + ЭДП.

3. Во всех случаях в приоритетных по энергоемкости и по выбросу парниковых газов оказываются процессы, не связанные с использованием чугуна в производстве стали.

4. При этом следует отметить, что в процессе ЛП-В выплавляется легированная ванадием сталь.

Список использованных источников

1. Чесноков Ю. Н., Лисиенко В. Г., Лаптева А. В. Математические модели косвенных оценок эмиссии CO₂ в некоторых металлургических процессов // Сталь. 2011. № 8. С. 74–77.
2. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В. Г., Лаптева А. В. Разработка графов эмиссии диоксида углерода металлургическими предприятиями // Металлург. 2012. № 12. С. 23–26.
3. Металлургия чугуна / под ред. Ю. С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
4. Никифоров Г. В., Олейников В. К., Заславец Б. И. Энергосбережение и управление энергопотреблением в металлургическом производстве. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 480 с.
5. Лисиенко В. Г., Соловьева Н. В., Трофимова О. Г. Альтернативная металлургия: проблема легирования, модельные оценки эффективности / под ред. В. Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2007. – 440 с.
6. Чесноков Ю. Н., Лисиенко В. Г., Лаптева А. В. Сквозная эмиссия диоксида углерода в тандеме процессов Corex и ЭДП (тезисы доклада) // Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции «Инженерная экология». М., 2011. С. 50–54.

7. Чесноков Ю. Н., Лисиенко В. Г., Лаптева А. В. Сквозная эмиссия диоксида углерода в процессе ХИЛ-3 (HYL-3) (тезисы доклада) // Сборник докладов I Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ'2012) с международным участием «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве». Екатеринбург: ИМиМ УрФУ, 2012. С. 155–158.

8. Чесноков Ю. Н., Лисиенко В. Г., Лаптева А. В. Сравнительная интегральная эмиссия диоксида углерода в полном цикле процесса прямого легирования стали ванадием (ЛП-В) // Сборник научных трудов международной конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии». Екатеринбург: ИМиМ УрФУ, 2012. С. 154–157.

9. Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгичев М. Г. Плавильные агрегаты: Теплотехника, управление и экология. Справочное пособие. В 4 кн. Кн. 2 / под ред. В. Г. Лисиенко. – М.: Теплотехника, 2005. – 912 с.

УДК 669-5

**Н. Б. Лошкарев, В. А. Чистополов, А. А. Ашихмин,
А. Б. Попов, И. М. Хамматов**

ОАО «ВНИИМТ», г. Екатеринбург, Россия

АВТОМАТИЧЕСКИЙ АГРЕГАТ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ

Аннотация

На многих машиностроительных и металлургических предприятиях возникает потребность в термообработке мелких партий, а подчас и единичных изделий различного назначения.

ОАО «ВНИИМТ» разработал полностью автоматизированный агрегат для термообработки до 500 кг стальных изделий различной формы.

Агрегат предназначен для проведения технологических операций нагрева, закалки или нормализации, а также отпуска или аустенизации изделий из различных марок сталей.

Ключевые слова: термообработка, автоматизация, нормализация, аустенизация, отжиг, отпуск, нагревательная печь.

Схема агрегата термообработки показана на рис. 1.

В состав агрегата входят: телескопический толкатель, стол загрузки, нагревательная печь, закалочная ванна и стол выгрузки.

Стол загрузки предназначен для установки оператором специального поддона или корзины с изделиями, перед их посадкой в печь. Изделия укладывают на поддон вручную в один ряд, либо в корзинах навалом. Максимальная масса садки 500 кг.

Для перемещения поддона с изделиями (или корзины) в агрегате применяется толкатель. С целью уменьшения габаритов толкатель по своему конструктивному оформлению выполнен телескопическим. Основная толкающая ступень – роликовая. Эта ступень выполнена в виде квадратной трубы (сечением 140x140 мм), перемещающейся на двух роликах по направляющим. Сверху на корпусе трубы толкателя укреплена цепь, в зацепление с которой