

Лисиенко В. Г. /д. т. н./, Чесноков Ю. Н. /к. т. н./,  
Лаптева А. В.  
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет»

## Энергоемкость и эмиссия CO<sub>2</sub> различных сочетаний переделов при производстве стали

Приведены результаты сравнительных расчетов энергоемкости и эмиссии диоксида углерода – парникового газа – в цепочках металлургических переделов при производстве стали. Ил. 2. Табл. 5. Библиогр.: 11 назв.

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

*The results of comparative calculations of energy consumption and emissions of carbon dioxide – a greenhouse gas – in chains of metallurgical production by steel production are presented.*

**Keywords:** steelmaking, greenhouse gas, carbon dioxide, technological fuel number, technological greenhouse number

В работах [1, 2] были проведены сравнительные оценки энергоемкости производства стали для ряда альтернативных бескоксовых процессов в сопоставлении с использованием традиционного аглодоменного процесса. 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 с позиций эмиссии парниковых газов – по так называемому «углеродному следу». Целесообразно при этом привести также и уточненные данные по энергоемкости (в форме технологического топливного числа – ТТЧ) соответствующих процессов производства стали для возможности сопоставления уровня сквозной эмиссии парникового газа CO<sub>2</sub> (в энергетических единицах) и ТТЧ.

В процессах черной металлургии в основном образуются два парниковых газа: метан CH<sub>4</sub> и диоксид углерода CO<sub>2</sub>. Метан сопутствует добыче сырья для металлургических предприятий, выделяясь из горных пород. Его объемы не зависят от технологических процессов и носят случайный характер. Метан, который возникает в металлургических процессах, является частью вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) и сгорает при их использовании. 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 (итоговой) сквозной эмиссии диоксида углерода M<sub>с</sub>. Сквозной эмиссия названа по той причине, что она является суммой эмиссий CO<sub>2</sub>, которые последовательно возникают во всех процессах технологической цепи, начиная с добычи сырья и кончая тем продуктом, для которого эта эмиссия определяется. Она является суммой итоговой эмиссии CO<sub>2</sub> процесса M<sub>п</sub> и транзитной M<sub>т</sub>:

$$M_c = M_p + M_t. \quad (1)$$

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

Итоговая эмиссия процесса M<sub>п</sub> определяется по количеству полностью сгоревшего углерода в процессе в предположении, что ВЭР, образованные в этом процессе, используются полностью в этом же процессе (для производства электроэнергии, кислорода и т. п.). Диоксид углерода в продуктах сгорания присутствует вместе с оксидом углерода. Например, доменный газ содержит, об. %: CO 25-27, CO<sub>2</sub> 16-23, в зависимости от содержания кислорода в дутье [3]. Часть CO окисляется в воздухонагревателях до CO<sub>2</sub>. Но большая часть сгорает в котлах местных электростанций, обеспечивая до 90 % электроэнергии, потребляемой металлургическими предприятиями [4], а в простейшем случае CO сжигается в факелах или дожигается в специальных устройствах. Таким образом, массу CO<sub>2</sub>, образующегося в доменном, коксохимическом, электродуговом, мартеновском процессах

следует определять с учетом дожигания CO по суммарной массе углерода, содержащегося в соответствующих газовых смесях. В кислородно-конвертерном процессе с дожиганием масса CO<sub>2</sub> будет пропорциональна массе выгоревшего из шихты углерода. В этой связи вся масса диоксида углерода, полученного от сгорания топлива, например, в доменной печи, в воздухонагревателях, в котлах местных электростанций отнесена к доменной печи (чугуну). Эта масса и эмиссии M<sub>T</sub>, M<sub>C</sub> названы итоговыми. Для исключения двойного счета эмиссии диоксида углерода при расчете эмиссии в доменном процессе исключены эмиссии от электроэнергии, например, для получения кислорода, обеспечения дутья и т. п. (рис. 1).

На рис. 1 в соответствующих вершинах стоят нули. Такой граф применяется для расчета сквозных эмиссий CO<sub>2</sub>. В вершинах графа указаны значения, приведенные к единице продукции сквозных эмиссий диоксида углерода или приведенные к единице продукции эмиссии процесса перед косой чертой и приведенных к единице продукции сквозных эмиссий после черты. На дугах графа указаны веса дуг – расходы того или иного продукта, названного в вершине, из которой выходит дуга. Транзитная эмиссия определяется суммой произведений значений сквозных эмиссий инцидентных вершин на веса соответствующих дуг. Числовые данные на этом рис. отличаются от данных,

приведенных в табл. 1-3, т. к. взяты другие расходы материалов и ресурсов.

Методы и формулы определения сквозных эмиссий в различных технологических процессах черной металлургии приведены в литературе [5, 6].

Значения сквозных эмиссий CO<sub>2</sub> 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) [7] введено понятие *технологического парникового числа* (ТПЧ) для процесса

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

где M<sub>k</sub> – фактическая удельная масса выбросов парниковых газов k-го загрязняющего вещества, т выбр./т прод., для i-го передела; K<sub>b</sub> – коэффициент перевода стоимостной оценки ущерба к оценке в условных энергетических единицах (кг у.т/т п.г.). Если принять в качестве топли-

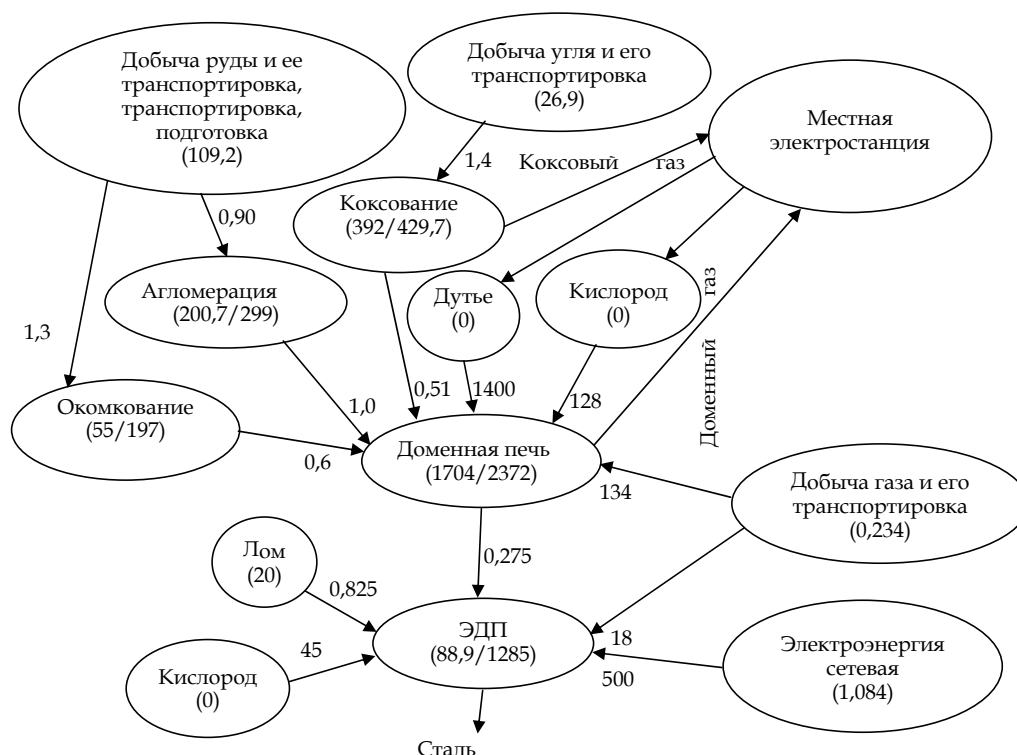


Рис. 1. Граф эмиссий диоксида углерода в металлургических переделах

## 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 <sup>3</sup>	1,34	134,00		134,00	18,00	342,00	18,00
Азот, м <sup>3</sup>	0,082				0,47		0,47
Аргон, м <sup>3</sup>	0,845				0,75		0,75
Вода, м <sup>3</sup>	0,120	36,0	1,00	36,0	15,00	2,00	15,00
Компрессорный воздух, м <sup>3</sup>	0,0087				81,00		81,00
Дутье (подогрев), м <sup>3</sup>	0,104	1400,0		1400,0			
Кислород, м <sup>3</sup>	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
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	расчет					798,4	
Чугун, ТТЧ	расчет	946		946			
Доменный газ, м <sup>3</sup>	0,117	-2000		-2000			
Сталь, ТТЧ	расчет		926,1		637,3		639,2

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 <sup>3</sup>	1,34	334,00	18,00		18,00		18,00
Уголь, т	962,00			1,20		1,05	
Азот, м <sup>3</sup>	0,082		0,47		0,47	20	0,47
Аргон, м <sup>3</sup>	0,845		0,75		0,75		0,75
Вода, м <sup>3</sup>	0,120	2,00	15,00	7,00	15,00	1,50	15,00
Компрессорный воздух, м <sup>3</sup>	0,0087		81,00	300	81,00		81,00
Кислород, м <sup>3</sup>	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
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	66,05	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	
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	расчет	769,5					
Чугун, ТТЧ	расчет			1078		931	
ВЭР, м <sup>3</sup>	0,223					-2666	
Сталь, ТТЧ	расчет		629,7		680,6		632,3

Расчетные данные по определению ТТЧ и ТПЧ

Сырьевые ресурсы и основные показатели	ТТЧ, кг у.т./ед.	Расходы на т продукции			
		ЛП-В			ЭДП
		ПЖВ	ШП	ЭДП	
Коксик, т	1000,0			0,005	0,005
Природный газ, м <sup>3</sup>	1,34			18,00	18,90
Уголь, т	962,00	2,162			
Азот, м <sup>3</sup>	0,082			0,47	0,47
Аргон, м <sup>3</sup>	0,845			0,75	0,75
Вода, м <sup>3</sup>	0,120	19,00	5,00	15,00	15,00
Компрессорный воздух, м <sup>3</sup>	0,0087			81,00	81,00
Кислород, м <sup>3</sup>	0,240	394,00		18,5	48,9
Холодное дутье, м <sup>3</sup>	0,0087	1582			
Электроэнергия, кВт·ч	0,390	233,0	115,0	467,0	583,0
Алюминий, т	5362,00			0,002	0,002
Заправочные материалы, т	490			0,004	0,004
Известь, т	283,00	0,050		0,058	0,058
Лом, т	7,30			0,47	1,1
Оборудование и сооружения, ТАЧ	1,00	66,6	50,0	50,0	50,0
Огнеупоры на ремонт печи, т	500,00			0,007	0,007
Окатыши металлизированные, т	см. расчет			0,55	
Окатыши не офлюсованные, т	105,00		1,304		
Руда ванадийсодержащая, т	40,00	1,868			
Транспорт	2,00	1			
Ферромарганец, т	1033,0			0,003	0,003
Ферросилиций, т	2573,0			0,004	0,004
Чугун, т	см. расчет			0,200	0,025
Электроды, т	7200,0			0,005	0,005
Окатыши металлизированные, ТТЧ	расчет		429		
Чугун, ТТЧ	расчет	929			
ВЭР, м <sup>3</sup>	0,223		-1707		
Горячий восстановительный газ, м <sup>3</sup>	0,338	-4461	1707		
Сталь, ТТЧ	расчет			590,1	415,5

ва природный газ и его цену («газовый» эквивалент),  $K_b$  представляется в виде

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

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 м<sup>3</sup> или 0,35 долл. США за 1 м<sup>3</sup>,  $C_{пр.г} = 10,5$  руб. за 1 м<sup>3</sup>);  $Q_{н.пр.г}^p$  – низшая рабочая теплота сгорания природного газа (35,8 МДж/м<sup>3</sup>);  $Q_{н.у.т}^p$  – низшая рабочая теплота сгорания условного топлива (29,3 МДж/кг у.т.).

С учетом принятых значений параметров по формуле (3) получаем

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

Величина  $K_b$  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, изменится синхронно. Следовательно,  $K_b$  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.

Используя модели в виде графов [5], сквозное значение ТПЧ для конкретной продукции (например, чугуна) можно вычислять по значениям ТПЧ предыдущих переделов с учетом их массовых долей  $\Psi_i$ :

$$ТПЧ_{Ck} = K_b \left[ M_{Гк} + \sum_{i=1}^L \left( G_i \sum_{j=1}^N P_{kij} \right) + \sum_{m=1}^P \left( M_{Гm} \sum_{q=1}^R P_{kmq} \right) \right], \quad (4)$$

где  $M_{Гк}$  – эмиссия процесса, которому соответствует  $k$ -я вершина –  $k$ -й технологический процесс;  $G_i$  – сквозная эмиссия  $i$ -ой вершины-источника;  $L$  – количество вершин-источников, связанных с вершиной  $k$ ;  $N$  – количество путей из вершины  $i$  в вершину  $k$ ;  $P_{kij}$  – передача  $j$ -го пути из вершины  $i$  в вершину  $k$ , равная произведению весов дуг, образующий путь;  $P$  – количество промежуточных вершин, из которых имеются пути в вершину  $k$ ;  $M_{Гm}$  – эмиссия процесса в  $m$ -ой вершине;  $R$  – количество путей из вершины  $m$  в вершину  $k$ ;  $P_{kmq}$  – передача  $q$ -ого пути из вершину  $m$  в вершину  $k$ .

Исследованы металлургические переделы, применяемые как в мировой практике, так и в России – это традиционный передел с использованием кокса и аглодоменного процесса и альтернативные бескоксовые процессы. На выходе всех рассмотренных переделов для сравнимости принят 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) [5], Corex [8], Ромелт [7]), железный лом (ЭДП), губчатое железо (Midrex [7], Hyl-3 [9]), 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.

В табл. 1-3 приведены исходные данные для расчетов и результаты расчетов ТТЧ и ТПЧ. Табл. 1 и 2 содержат по два столбца для каждого передела. Второй столбец содержит данные для ЭДП. Первый столбец соответствует первому переделу в дуплексе. В табл. 3 для ЛП-В выделены три столбца (по одному для каждого агрегата), а для ЭДП, работающей на одном ломе, выделен один последний столбец.

Для оценки интегральной эмиссии диоксида углерода, например, в процессе прямого легирования стали ванадием (ЛП – В) следует рассматривать совокупную работу всех агрегатов [10] с реализацией экспортного газа в этом же процессе для выработки электроэнергии. В этом

процессе при использовании ванадийсодержащих титаномагнетитов применяются следующие агрегаты. Агрегат процесса жидкофазного восстановления (ПЖВ), работающий в смешанном режиме с наименьшей степенью дожигания для получения легированного ванадием чугуна и горячего восстановительного газа (ГВГ), шахтной печи (ШП), где происходит процесс металлизации окисленных окатышей, агрегат деванадации чугуна с получением ванадиевого шлака и полупродукта и ЭДП. Деванадатор добавлен в технологический процесс для улучшения процесса легирования. Этим агрегатом может быть конвертер или ковш. Восстановительные газы из агрегата ПЖВ используются для газотвердофазной металлизации в шахтной печи. В ШП поступают рудное сырье и ГВГ. Из ШП выходят металлизированные окатыши (М.О.) и экспортный газ. В ПЖВ (газификатор) поступают уголь с  $C^p = 73,1 \%$ , рудное сырье, дутье. На выходе ПЖВ – шлак и полупродукт (чугун). Металлизированное сырье, полупродукт из деванадатора и лом загружаются в ЭДП. В ЭДП подается электроэнергия, кислород, природный газ. Экспортный газ используется в самом процессе ЛП-В для производства электроэнергии. На рис. 2 показаны материалы и их расходы на 1 т электростали ЭДП [11].

На рис. 3 представлен график эмиссий диоксида углерода полного цикла процесса ЛП-В [10]. Здесь электроэнергия учтена для каждого ресурса, т. к. эмиссии диоксида углерода для ПЖВ и ШП рассчитаны с учетом содержания оксида углерода. Пунктирные дуги показывают движение газов и не участвуют в расчетах сквозных эмиссий.

Эмиссии диоксида углерода процессов в ЭДП рассчитываются по моделям, приведенные в [4]. Причем при расчетах учитывалось только выгорание углерода из шихты (М.О.  $C = 1,7 \%$ ; лом  $C = 0,12 \%$ ; чугун  $C = 4 \%$ ; сталь  $C = 0,3 \%$ ) и 5 кг электродов с  $C = 100 \%$ . Эмиссии процессов агрегатов ПЖВ, ШП по модели [4] рассчитать не возможно, так как эти модели построены с учетом полного сгорания топлива, а в названных агрегатах полное сгорание отсутствует. В этой связи эмиссии диоксида углерода таких агрегатов были рассчитаны на основе данных по составу ГВГ и экспортного газа из [7].

Методики расчета эмиссий  $CO_2$  для различных цепей переделов приведены в литературе [8-10]. 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 [11]. Так, при доле чугуна 30 % в шихте

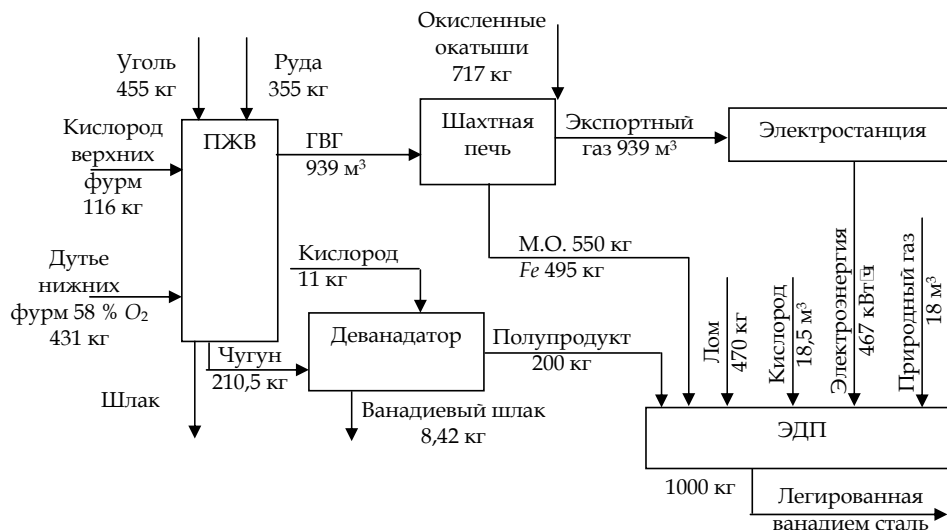


Рис. 2. Структурная схема полного цикла ЛПП-В

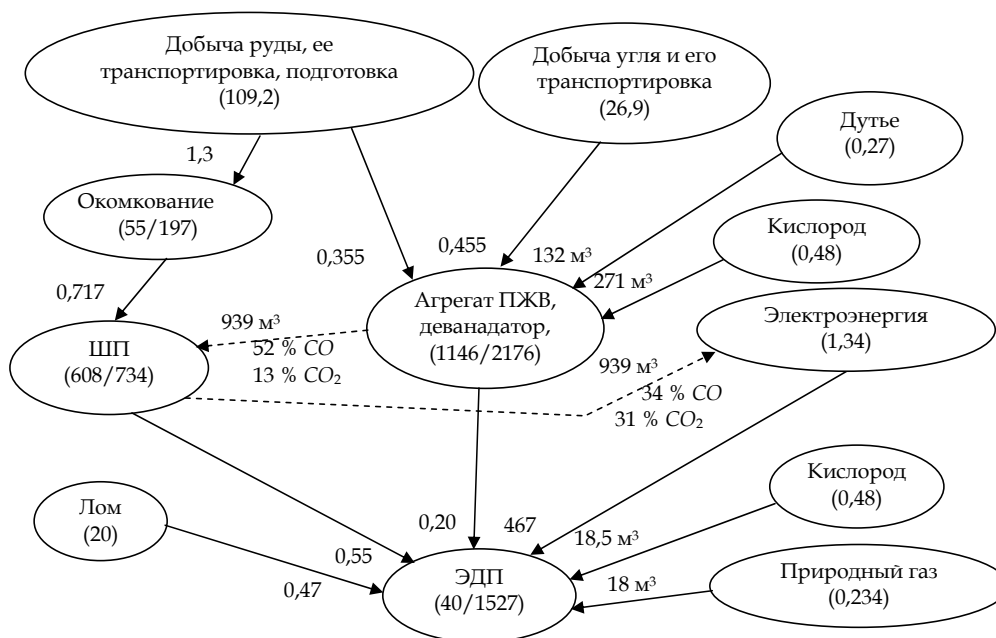


Рис. 3. Граф эмиссий диоксида углерода в процессе ЛПП-В

расход электроэнергии снижается на 130 кВт·ч, а при доле чугуна 40 % - на 160 кВт·ч.

В табл. 4 технологические цепи расположены по увеличению значений эмиссии CO<sub>2</sub>. Как видим, в тройку наиболее приоритетных процес-

сов по значению ТТЧ входят переделы ЭДП на ломе, ЛПП-В, НуЛ-3 + ЭДП. По суммарному показателю ТТЧ + ТПЧ приоритетными оказались другие переделы: ЭДП на ломе, НуЛ-3 + ЭДП, Midrex + ЭДП.

Таблица 4

Значения эмиссий диоксида углерода, сквозных ТПЧ и ТТЧ в различных сочетаниях металлургических переделов производства стали

Процесс	Эмиссия CO <sub>2</sub> (Э) на т продукции		Сквозное ТПЧ <sub>с</sub> , кг у.т. на т	ТТЧ, кг у.т. на т	ТПЧ+ТПЧ, кг у.т. на т	Э/ТТЧ
	Сквозная, кг	Объемная, м <sup>3</sup>				
ЭДП на ломе	482	244	84,1	415,5	499,8	1,16
НуЛ-3+ЭДП	1125	569	196,9	629,7	826,5	1,79
Midrex+ЭДП	1224	619	214,2	639,2	853,4	1,92
ДП+ЭДП	1434	725	251,0	637,3	888,3	2,25
ЛПП-В	1567	793	274,2	590,1	864,3	2,66
Ромелт+ЭДП	2004	1015	350,7	680,6	1031,3	2,95
Corex+ЭДП	2018	1021	353,2	632,3	985,5	3,19
ДП+конвертер	2307	1167	403,7	926,1	1329,8	2,49

Надо заметить, что использование чугуна в шихте ЭДП, кроме экономии электроэнергии, снижает накопление в стали вредных примесей, содержащихся в ломе и трудно удаляемых в процессах плавки (медь и другие примеси).

### Выводы

1. Для сравнительной оценки технологических процессов в рамках энерго-экологического анализа рассмотрена как энергоемкость, так и параметр эмиссии парникового газа  $\text{CO}_2$  – технологическое парниковое число (ТПЧ).

2. Дана оценка энергоемкости и сквозной эмиссии диоксида углерода при производстве стали для процессов с использованием аглодомного 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  $\text{CO}_2$  при использовании лома в ЭДП, процесса ЛП-В, а также процессов  $\text{HyL-3} + \text{ЭДП}$ ,  $\text{Midrex} + \text{ЭДП}$ .

3. При этом следует отметить, что в процессе ЛП-В выплавляется легированная ванадием сталь. Во всех случаях в приоритеных по энергоемкости и по выбросу парниковых газов оказываются процессы, не связанные с использованием чугуна в производстве стали.

Таблица 5

### 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	$\text{HyL-3} + \text{ЭДП}$	$\text{HyL-3} + \text{ЭДП}$
3	$\text{HyL-3} + \text{ЭДП}$	$\text{Midrex} + \text{ЭДП}$	$\text{Midrex} + \text{ЭДП}$
4	$\text{Corex} + \text{ЭДП}$	ДП + ЭДП	ЛП-В
5	ДП + ЭДП	ЛП-В	ДП + ЭДП
6	$\text{Midrex} + \text{ЭДП}$	Ромелт + ЭДП	$\text{Corex} + \text{ЭДП}$
7	Ромелт + ЭДП	$\text{Corex} + \text{ЭДП}$	Ромелт + ЭДП
8	ДП + конвертер	ДП + конвертер	ДП + конвертер

### Библиографический список

1. Лисиенко В. Г. Энергетические проблемы развития технологий производства черных металлов / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, А. В. Лаптева // Черная металлургия: Бюл. НТИ-ЭИ. – 2008. – № 8 (1304). – С. 60-67.

2. Чесноков Ю. Н. Разработка графов эмиссии диоксида углерода металлургическими предприятиями / Ю. Н. Чесноков, В. Г. Лисиенко, А. В. Лаптева // Металлург. – 2012. – № 12. – С. 23-26.

3. Металлургия чугуна / Под ред. Ю. С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.

4. Никифоров Г. В. Энергосбережение и управление энергопотреблением в металлургическом производстве / Г. В. Никифоров, В. К. Олейников, Б. И. Заславец. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 480 с.

5. Лисиенко В. Г. Энергетические возможности бескоковых технологий производства черных металлов / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, А. В. Лаптева // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 9. – С. 56-61.

6. Чесноков Ю. Н. Математические модели косвенных оценок эмиссии  $\text{CO}_2$  в некоторых металлургических процессах / Ю. Н. Чесноков, В. Г. Лисиенко, А. В. Лаптева // Сталь. – 2011. – № 8. – С. 74-77.

7. Лисиенко В. Г. Альтернативная металлургия: проблема легирования, модельные оценки эффективности / В. Г. Лисиенко, Н. В. Соловьева, О. Г. Трофимова. Под ред. В. Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2007. – 440 с.

8. Чесноков Ю. Н. Сквозная эмиссия диоксида углерода в тандеме процессов  $\text{Corex}$  и ЭДП (тезисы доклада) / Ю. Н. Чесноков, В. Г. Лисиенко, А. В. Лаптева // Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции «Инженерная экология». Москва, 2011. – С. 50-54.

9. Чесноков Ю. Н. Сквозная эмиссия диоксида углерода в процессе ХИЛ-3 ( $\text{HyL-3}$ ) (тезисы доклада) / Ю. Н. Чесноков, В. Г. Лисиенко, А. В. Лаптева // 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.

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

11. Лисиенко В. Г. Плавильные агрегаты: Теплотехника, управление и экология. Справочное пособие. В 4-х книгах. Кн. 2 / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев / Под ред. В. Г. Лисиенко. – М.: Теплотехника, 2005. – 912 с.

Поступила 02.08.2014