

На правах рукописи



ЛАПТЕВА Анна Викторовна

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА
ЭНЕРГО-ПАРНИКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОКСОВЫХ И
БЕСКОКСОВЫХ ПРОИЗВОДСТВ ЧУГУНА И СТАЛИ**

05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена на кафедрах «Автоматика» и «Металлургия железа и сплавов» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Лисиенко Владимир Георгиевич

Официальные оппоненты: **Парсункин Борис Николаевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», профессор кафедры автоматизированных систем управления;

Ровнушкин Виктор Аркадьевич, кандидат технических наук, ОАО «Уральский институт металлов», исполнительный директор Научно-исследовательского центра металлургии стали и ферросплавов

Ведущая организация: ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники», г. Екатеринбург

Защита состоится «11» ноября 2016 г. в 17:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=261719>

Автореферат разослан «__» сентября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сулицин Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Металлургический комплекс играет значительную роль в экономическом развитии страны. В металлургии расходуется большинство из всех энергетических ресурсов, используемых в промышленности. Значительная доля этих ресурсов приходится на черную металлургию.

В черной металлургии функционирует наряду с традиционным аглодоменным процессом ряд развивающихся бескоксовых технологий. Важным аспектом их деятельности является экономия энергетических ресурсов, и в связи с этим большую актуальность приобретает сравнительный анализ технологий по такому важному показателю энергосбережения как энергоёмкость выпускаемой продукции. С расходом энергоресурсов тесно связаны так называемые выбросы парниковых газов в атмосферу, влияющие на климатические условия на планете. Необходимость и конкретные цифры снижения выбросов парниковых газов в нашей стране обоснована в докладах Президента Российской Федерации В. В. Путина на VII сессии Генеральной Ассамблеи ООН и на XXI Конференции по климату (2015 год), что еще раз подчеркивает актуальность данного исследования.

Об актуальности работы также свидетельствует Федеральный закон от 21 июля 2014 года № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные Законодательные акты Российской Федерации». В этом законе определена необходимость формирования банка наилучших доступных технологий, нацеливающих предприятия как на экономию энергоресурсов, так и на предотвращение негативного воздействия на окружающую среду.

Степень разработанности проблемы

Проблемы экономии энергоресурсов в промышленности, и, в частности, в черной металлургии рассматривались и развивались в ряде научных школ. Так, в представлении Уральской научной школы, важным инструментом решения данной проблемы является сквозной энергоэкологический анализ (СЭЭА) технологических процессов (ТП), органически сочетающий рассмотрение тесно связанных энергетических и экологических характеристик. В рамках данной научной школы проанализирован целый ряд ТП черной металлургии.

Тем не менее, развитие металлургических процессов, появление целого ряда альтернативных бескоксовых процессов требует активного продолжения использования методов СЭЭА для оценки их особенностей и преимуществ в этом важном аспекте.

С определением эмиссии парникового газа CO_2 (наиболее характерного для черной металлургии) связаны работы по инвентаризации этих газов.

Цели и задачи работы

На основании вышеизложенного были сформулированы **цели** настоящей работы:

1. Определение и сравнительная оценка энергетических характеристик и характеристик эмиссии парникового газа CO_2 (парниковых характеристик) традици-

онных (коксовых) и альтернативных (бескоксовых) процессов производства чугуна и стали. Выявление рангов процессов по этим характеристикам и наиболее экономичных и экологически совершенных альтернативных процессов.

В рамках поставленных целей сформулированы следующие задачи:

1. Усовершенствовать методику СЭЭА с разработкой методики парникового анализа ТП производства чугуна и стали.

2. Уточнить модели эмиссий CO_2 в натуральном и энергетическом представлении для процессов производства чугуна и стали, пригодных для сравнения сочетаний различных процессов по значению эмиссии CO_2 .

3. Разработать методики парникового анализа ТП и модели интегральных эмиссий CO_2 в натуральном и энергетическом представлении для процессов производства чугуна и стали с целью сравнения сочетаний различных процессов.

4. Провести ранжирование ТП по энергоёмкости и углеродному следу в натуральном и энергетическом представлении и их сумме, т. е. в рамках оценки наилучших доступных технологий. В частности провести оценку особенностей прямого легирования стали ванадием (ЛП-В) в ряду процессов производства чугуна и стали.

5. Разработать показатели степени воздействия на окружающую среду – индикаторы устойчивого развития – процессов производства чугуна и стали, связанных с эмиссией CO_2 . С помощью этих индикаторов выявить наилучших доступных технологий.

6. Разработать новые процессы получения легированной ванадием стали с более полным использованием вторичные энергетические ресурсы (ВЭР) – новых модификаций процесса ЛП-В и анализом энергоёмкости продукции.

7. Разработать и проанализировать с энерго-парниковой точки зрения новые устройства получения стали, характеризующиеся более полным использованием ВЭР в самих процессах – новых модификаций процесса ЛП-В производства легированной ванадием стали с электродуговой плавкой и анализом энергоёмкости продукции.

Научная новизна

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

- усовершенствована методика СЭЭА (Лисиенко В. Г. и др.) с введением новых структурных элементов: технологического амортизационного числа (ТАЧ) и технологического парникового числа (ТПЧ);
- разработана методика определения интегральной эмиссии CO_2 в ТП, пригодная для сравнительного анализа различных вариантов технологий;
- предложена новая методика определения сквозной эмиссии CO_2 или углеродного следа, основанная на использовании теории графов;
- представлены результаты сравнительных энергетических и парниковых исследований процессов производства чугуна и стали;
- предложены индикаторы устойчивого развития, основанные на относительных параметрах: сквозной эмиссии CO_2 , себестоимости и энергоёмкости стали, получаемой в различных сочетаниях процессов производства чугуна, стали, губчатого железа, металлизированных окатышей (МО);

- разработаны новые способы производства легированной ванадием стали.

Теоретическая и практическая значимость

В работе усовершенствована методика энергетического анализа и разработана методика определения эмиссии парникового газа CO_2 в применении к традиционному аглодоменному и альтернативным бескоксковым процессам, в том числе предложены индикаторы устойчивого развития.

Практическая значимость определяется рекомендациями по оценке энергоэкологических характеристик процессов производства чугуна и стали, выявлением наиболее эффективных в этом плане процессов.

Предложенный методический подход к определению углеродного следа может быть использован для комплексной оценки экологической и технической эффективности вновь создаваемых и реконструируемых предприятий разработчиками и проектировщиками металлургических предприятий.

Анализ различных процессов производства чугуна, губчатого железа и стали позволяет выявить перспективные направления модернизации с целью снижения эмиссии CO_2 .

Разработаны новые процессы производства стали – процесс ЛП-В.

Результаты работы использованы при анализе ТП, а также в учебном процессе, в частности, при чтении учебных курсов «Управление и информатика в энергосбережении и экологии», «Математическое моделирование объектов и систем управления».

Методология и методы исследования

Методологической основой являлся метод СЭЭА, дополненный и усовершенствованный в части сквозного энергетического анализа (СЭА) и развитый в части парникового анализа – определение эмиссий CO_2 в процессах выплавки чугуна и стали.

Для анализа процессов применена теория графов. Используются методики сравнительного анализа рассматриваемых процессов с применением специально усовершенствованного программного обеспечения (ПО).

Объектами исследования явились как традиционный аглодоменный процесс, так и альтернативные бескоксковые (в том числе и разработанные при участии автора) металлургические процессы.

Положения, выносимые на защиту

На защиту автором выносятся:

1) Усовершенствованная методика энергетического анализа при введении в его структуру ТАЧ и ТПЧ, позволяющие перевести амортизационные отчисления (АО) и ущерб от эмиссии парниковых газов в энергетические параметры.

2) Методика определения интегральной эмиссии CO_2 в ТП, предназначенная для сравнительного анализа различных видов технологий производства чугуна и стали.

3) Методика вычисления сквозной эмиссии CO_2 углеродного следа, основанная на использовании теории графов.

4) Результаты энергетического и парникового (эмиссий CO_2) анализов различных сочетаний коксовых и бескоксковых процессов в металлургии с использованием разработанных математических моделей (ММ) и алгоритмов и ранжированием этих процессов. При этом выделено шесть типов (цепочек) металлургиче-

ских процессов в соответствии с механизмом образования CO_2 . Для этих типов разработаны ММ, позволяющие оценить эмиссию CO_2 соответствующего процесса. С использованием этих ММ проведены исследования различных металлургических процессов.

5) Новые модификации процесса ЛП-В.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность полученных результатов определяется применением современных методов СЭЭА.

При проведении расчетов использовались известные показатели ТП (аглодомное производство, процесс Ромелт, Midrex, НуL-3). В ряде случаев проведен сравнительный анализ с известными энергетическими показателями (аглодомный процесс, процесс Ромелт).

Апробация результатов работы

Результаты работы представлялись на региональных, всероссийских и международных конференциях, в том числе: V Международная научно-практическая конференция «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология. Безопасность технологических процессов» (Москва, 2010); IX Международный симпозиум «Проблемы экоинформатики» (Москва, 2010); XVI Международная конференция «Теплотехника и энергетика в металлургии» (Днепропетровск, 2011); VIII Всероссийская научно-практическая конференция «AS'2011. Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (Новокузнецк, 2011); Международная научная конференция «Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии» (Магнитогорск, 2012); Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Новокузнецк, 2015).

Публикации

По результатам диссертационного исследования опубликованы 24 научные работы, в том числе 12 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК России; 2 патента на полезные модели; 10 статей в научных журналах и сборниках материалов всероссийских и международных конференций.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 8-ми глав, заключения, списка использованных источников и 4-х приложений. Содержит 186 страниц основного текста, 52 рисунка, 72 таблицы. Список использованных отечественных и зарубежных источников включает 136 наименований. Приведены результаты расчетов: в приложении А – эмиссии CO_2 при легировании стали феррованадием, в приложении Б – материальные и энергетические балансы запатентованного нового устройства производства стали, в приложение В – расходы в процессе прямого легирования стали (ЛП) при производстве 1 т стали, в приложении Г помещены копии актов об использовании результатов исследования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обзор работ в области СЭЭА, оценка технологий и постановка задач исследований

За рубежом находят практическое применение около десятка технологий, из которых следует выделить прямые бескоксовые процессы НуL-3, Midrex, Corex,

российская технология Ромелт. В разработке новых процессов производства черных металлов активно участвуют отечественные организации: Национальный исследовательский технологический университет – МИСИС, Институт Metallургии УрО РАН, Институт Metallургии и Материаловедения им. А. А. Байкова РАН, УрФУ (УГТУ-УПИ) и многие другие. Уделено внимание технологии ЛП-В. Процесс ЛП-В содержит три агрегата: печь жидкофазного восстановления (ПЖВ), шахтную печь (ШП) и электродуговую печь (ЭДП).

Рассмотрены методы СЭЭА, разработанного в УГТУ-УПИ и Уралэнергочермете в начале 80-х годов XX века. Описаны понятия СЭА – технологического топливного числа (ТТЧ) – и сквозного экологического анализа – технологического экологического числа (ТЭЧ), а также их суммарного показателя – технологического топливно-экологического числа – $ТТЭЧ = ТТЧ + ТЭЧ$. Минимальное значение этого показателя характеризует наилучшие доступные технологии, энерго-экологическую эффективность процесса.

В черной металлургии основная часть эмиссии парниковых газов представлена CO_2 . Остальные газы сгорают в составе ВЭР. В этой части первой главы приведены различные существующие методики определения эмиссии CO_2 предприятиями применительно к производству чугуна и стали. Таким образом, в работе проведен сравнительный СЭЭА следующих ТП и технологических агрегатов: доменной печи (ДП), НуL-3, Midrex, Corex, Ромелт в тандеме с выплавкой стали в ЭДП. Процесс ЛП-В включает в свой состав ЭДП. ДП также рассматривается в тандеме с кислородным конвертером (КК).

По результатам обзора сформулирована цель и задачи исследований.

Глава 2. Развитие методики сквозного энергоэкологического и парникового анализа

Дальнейшее усовершенствование методики сквозного энергоэкологического и парникового анализа и анализ ТТЧ различных процессов. Парниковый анализ – это анализ эмиссий CO_2 металлургическими агрегатами.

В соответствии с представлением Уральской школы энергоэкологического анализа, в работе использовались энергоэкологические характеристики: ТТЧ – энергоёмкость продукции без учета энергетических затрат человеческого труда; ТЭЧ – величина экологического ущерба, пересчитанная в энергетические единицы.

Усовершенствовано новое понятие технологического топливно-экологическо-парникового числа (ТТЭПЧ):

$$ТТЭПЧ = ТТЧ_{\Sigma} + ТЭЧ + ТПЧ, \quad (1)$$

где $ТТЧ_{\Sigma} = \sum \Psi_i \cdot ТТЧ_i + ТАЧ$ – суммарное ТТЧ; Ψ_i – коэффициент расхода i -го ресурса; $ТТЧ_i$ – ТТЧ i -го ресурса. ТТЭПЧ определяет сквозную энергоэкологическую и парниковую характеристику процесса. Чем меньше значение ТТЭПЧ у процесса, тем меньше его энергоёмкость и меньший вред он наносит окружающей среде. Этот параметр позволяет выбирать наилучшие доступные технологии для внедрения.

В предлагаемой работе ТЭЧ не рассматривается, по этой причине формула (1) упрощена до выражения технологического топливно-парникового числа (ТППЧ):

$$ТППЧ = ТТЧ_{\Sigma} + ТПЧ. \quad (2)$$

Энергетический новый параметр ТАЧ – это количество килограмм условного топлива (у. т.), эквивалентного величине АО на единицу выпускаемой продукции. Значение ТАЧ рассчитывается по формуле:

$$ТАЧ = \frac{A}{C_{\text{пр.г.}}} \cdot \frac{Q_{\text{н.пр.г.}}^p}{Q_{\text{н.у.т.}}^p}, \quad (3)$$

где A – величина АО в денежном эквиваленте, (\$ США/ед. прод.); $C_{\text{пр.г.}}$ – цена 1 м³ природного газа (ПГ), принимается на уровне 0,55 \$ США/м³; $Q_{\text{н.пр.г.}}^p$ – низшая рабочая теплота сгорания ПГ, 35,8 МДж/м³, $Q_{\text{н.у.т.}}^p$ – низшая рабочая теплота сгорания у. т., 29,33 МДж/кг у. т. Для приведенных значений ТАЧ = 2,231 · A .

В работе В. А. Роменца приведены данные по амортизационным расходам для некоторых переделов. Там же приведена цена ПГ, действующая в то время – $C_{\text{пр.г.}} = 0,08$ \$ США/м³, следовательно, $Q_{\text{н.пр.г.}}^p / (C_{\text{пр.г.}} \cdot Q_{\text{н.у.т.}}^p) = 15,257$ кг у. т./\$ США. С учетом этих данных в таблице 1 приведены значения ТАЧ для различных переделов черной металлургии. Полученные значения ТАЧ составляют от 55,3 кг у. т. (1,62 ГДж) до 163,7 кг у. т. (4,796 ГДж) на единицу готовой продукции. Приведенные данные являются обобщенными показателями. Конкретные значения будут зависеть от состояния, степени использования оборудования, соблюдения технологических режимов его работы. До введения понятия ТАЧ значение ТТЧ амортизации принимали равным 50 кг у. т./т прод. Как следует из таблицы, такое допущение приводило к заметной ошибке.

Таблица 1 – Значения ТАЧ для четырех переделов черной металлургии

Параметры	Название передела				
	ДП	Ромелт	Midrex	HyL-3	Corex
A , \$/т прод.	3,62	4,36	8,04	10,05	10,72
ТАЧ, кг у. т./т прод.	55,3	66,6	122,8	153,5	163,7

Предпоследний раздел второй главы посвящен **сравнительному энергетическому анализу коксоδοменных и альтернативных процессов производства стали**: ДП + КК; ДП + ЭДП; Corex + ЭДП; Ромелт + ЭДП; Midrex + ЭДП; HyL-3 + ЭДП; ЛП-В; ЭДП на ломе, ДП, ЭДП.

Рассчитанные с учетом данных уточнений величины ТТЧ различных ТП приведены в таблице 2. При этом определились и составляющие ТТЧ – первичная энергия \mathcal{E}_1 , производная энергия \mathcal{E}_2 , скрытая энергия \mathcal{E}_3 и ВЭР \mathcal{E}_4 .

В таблице 2 технологические цепи расположены по увеличению значений ТТЧ. Из нее следует, что в тройку наиболее приоритетных процессов по значению ТТЧ входят сочетания процессов ЛП-В, HyL-3 + ЭДП и ЭДП на ломе. Из данных таблицы 2 следует, что все процессы с использованием кокса имеют большое значение \mathcal{E}_1 .

Введено понятие ТПЧ процесса и продукта – сквозное ТПЧ (ТПЧ_с). ТПЧ – это количество килограмм у. т., требуемого для погашения стоимости экономического ущерба от выбросов парникового газа на единицу выпускаемой продукции. ТПЧ переводит рубли в кг у. т., т. е. экономические параметры в энергетические:

Таблица 2 – Ранжирование тандемов процессов по энергоёмкости стали

Ранг по ТТЧ	Технологическая цепь	Название передела	ТТЧ прод., кг у. т./т прод.	Составляющие ТТЧ			
				Э ₁	Э ₂	Э ₃	Э ₄
1	ЭДП на ломе	ЭДП	415,5	30	242	141	0
2	HyL-3 + ЭДП	HyL-3	769,54	448	40	294	0
		ЭДП	629,7	29	209	392	0
3	ДП + ЭДП	ДП	955	749	181	260	-234
		ЭДП	640,3	29	158	453	0
4	Midrex + ЭДП	Midrex	798,37	458	45	295	0
		ЭДП	639,2	29	209	401	0
5	Corex + ЭДП	Corex	931	1 010	163	353	-595
		ЭДП	632,3	29	158	445	0
6	Ромелт + ЭДП	Ромелт	1 078	1 154	0	172	-249
		ЭДП	680,6	29	158	493	0
7	ЛП-В	ПЖВ	929	2 079	201	155	-1 507
		ШП	429	0	46	187	-196
		ЭДП	775,8	29	190	557	0
8	ДП + КК	ДП	955	749	181	260	-234
		КК	934	0	14,5	920	0

$$ТТЧ_{Pi} = \frac{C_{в.в.}}{C_{пр.г.}} \cdot \frac{Q_{н.пр.г.}^p}{Q_{н.у.т.}^p} \cdot \sum_{k=1}^N (M_k \cdot ПГП_k) = K_{вп} \cdot \sum_{k=1}^N (M_k \cdot ПГП_k), \quad (4)$$

где $C_{вв}$ – плата природопользователя (предприятия) за загрязнение окружающей среды выбросами в атмосферу парниковых газов, принято значение 0,045 \$ США/т парн. газ; M_k – фактическая удельная масса выбросов парниковых газов, т выбр./т прод. для i -го передела; ПГП – потенциал глобального потепления, указывает во сколько раз k -ый парниковый газ оказывает парниковый эффект больше, чем CO_2 ; N – количество учитываемых парниковых газов (в предлагаемой работе учитывается эмиссия только CO_2 , т. е. $N = 1$); $K_{вп}$ – коэффициент перевода стоимостной оценки ущерба к оценке в условных энергетических единицах (кг у. т./т парникового газа). В результате размерность ТТЧ – кг у. т./ед. прод. С учетом численных значений $K_{вп} = 0,101$ кг у. т./т парникового газа. ТТЧ для процессов производства чугуна и стали однозначно определяется эмиссией CO_2 . Другие парниковые газы или не образуются в этих процессах, например, N_2O , или сгорают до CO_2 .

Таким образом, методика СЭЭА усовершенствована введением новых параметров, что расширило область входных параметров СЭЭА и его результативность.

Глава 3. Эмиссии парниковых газов в процессах производства чугуна и стали

Эмиссия CO_2 агрегата названа прямой $M_{пр}$. Суммарную эмиссию, получен-

ную от сжигания CO, CH₄ этого агрегата в других агрегатах, назвали косвенной M_к. Сравнить процессы (агрегаты) по значению прямых эмиссий не корректно, так как эти эмиссии составляют доли от итоговой эмиссии CO₂, порожденной работой того или иного агрегата (рисунки 1 и 2). К агрегатам, потребляющим ВЭР, относятся все агрегаты, в которых сгорают доменный, коксовый газы.

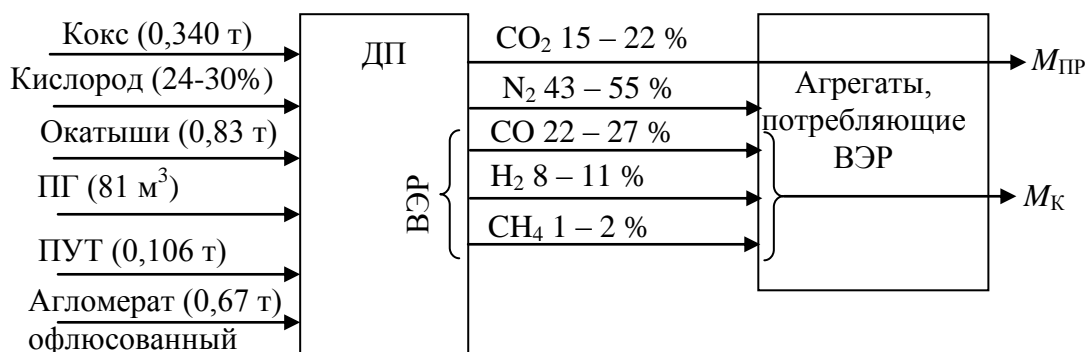


Рисунок 1 – Образование прямой и косвенной эмиссии CO₂ при работе ДП

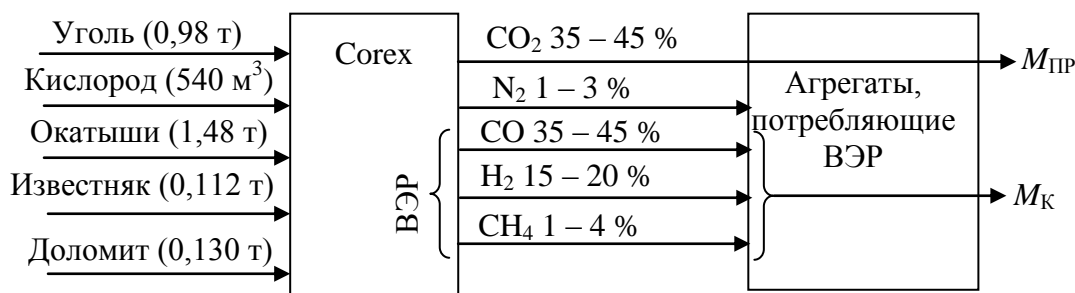


Рисунок 2 – Образование прямой и косвенной эмиссий CO₂ в процессе Corex

В этой связи введено понятие интегральной эмиссии CO₂ процесса

$$M_{\Pi} = M_{\text{ПР}} + M_{\text{к}}.$$

Аналогом углеродного следа из ГОСТ Р 56276-2014-ISO-TS 140672013 в этой работе является интегральная сквозной эмиссии CO₂ M_с, определяемая суммой

$$M_{\text{с}} = M_{\Pi} + M_{\text{Т}}, \quad (5)$$

где M_Т – интегральная транзитная эмиссия CO₂, обусловленная долей от суммарной массы эмиссии CO₂, образованного в предыдущих процессах, которая перешла на анализируемый процесс.

Эмиссия CO₂ процесса определяется из допущения, что все топливные ВЭР потребляются прямо или косвенно в этом же процессе, о чем говорит термин «интегральная» эмиссия. При определении эмиссии CO₂ принято, что весь углерод топлива или компонентов шихты окисляется полностью. Такое допущение не повлияет существенно на изложенные здесь результаты исследования, так как погрешность определения эмиссии CO₂ в различных процессах будет соизмерима, т. е. практически одна и та же.

Для вычисления значения сквозной эмиссии CO₂ представим процессы и их взаимосвязи в виде ориентированного взвешенного графа с размеченными вершинами – разновидности сигнальных графов. С целью наглядного вывода формулы вычисления сквозной эмиссии рассмотрим пример ориентированного графа эмиссии общего вида (рисунок 3). Веса дуг Ψ_{ik} , идущих из вершины k в вершину i ,

соответствуют удельным расходам ресурсов в единицах массы или объема, что определяется размерностью эмиссии в вершине, из которой исходит дуга (кг/т прод. или м³/т прод.). Внутри сдвоенных вершин полного графа указаны значения сигналов: транзитной эмиссии M_T , эмиссии процесса M_{Π} . Первый индекс обозначает номер передела, второй – номер процесса в переделе. Вершины, из которых стрелки только выходят, названы источниками. Значение их сквозной эмиссии обозначены G_{ik} , где первый индекс означает номер передела, второй индекс – номер источника. Для сигнальных графов значение сигнала в вершине равно сумме сигналов, поступающих от других вершин с учетом коэффициента передачи дуг.

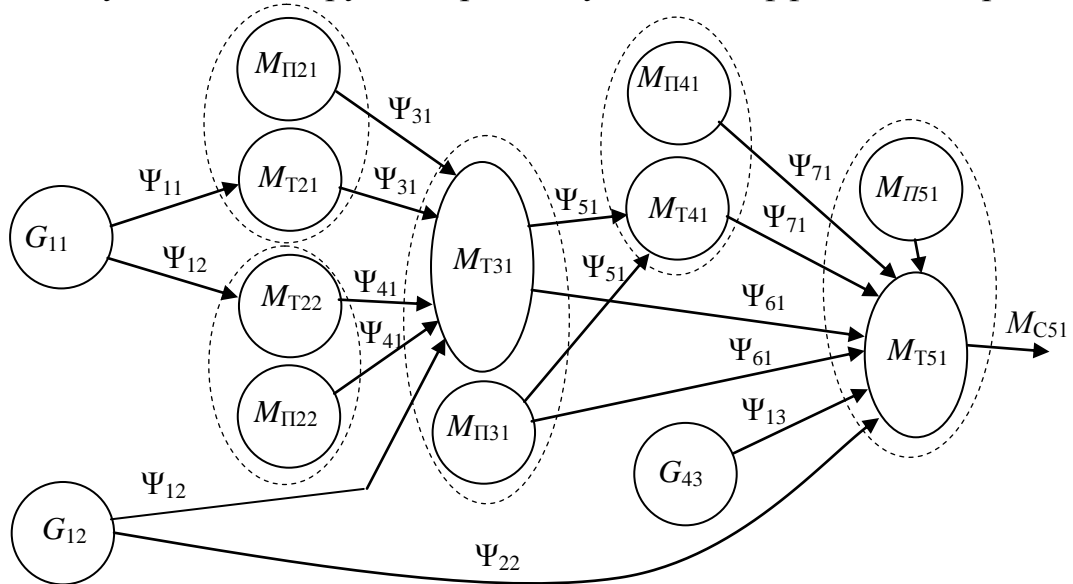


Рисунок 3 – Граф эмиссий CO₂

Тогда сквозной эмиссии, например, для вершины, 51 можно найти, используя следующие выкладки:

$$M_{C51} = M_{\Pi 51} + G_{43} \cdot \Psi_{13} + M_{\Pi 31} \cdot \Psi_{61} + G_{11} \cdot (\Psi_{11} \cdot \Psi_{31} \cdot \Psi_{61} + \Psi_{12} \cdot \Psi_{41} \cdot \Psi_{61} + \Psi_{11} \cdot \Psi_{31} \cdot \Psi_{51} \cdot \Psi_{71} + \Psi_{12} \cdot \Psi_{41} \cdot \Psi_{51} \cdot \Psi_{71}) + M_{\Pi 21} \cdot (\Psi_{31} \cdot \Psi_{61} + \Psi_{31} \cdot \Psi_{51} \cdot \Psi_{71}) + M_{\Pi 22} \cdot (\Psi_{41} \cdot \Psi_{51} \cdot \Psi_{71} + \Psi_{41} \cdot \Psi_{61}) + G_{12} \cdot (\Psi_{12} \cdot \Psi_{61} + \Psi_{12} \cdot \Psi_{51} \cdot \Psi_{71} + \Psi_{22}) + M_{\Pi 41} \cdot \Psi_{71} + M_{\Pi 31} \cdot \Psi_{51} \cdot \Psi_{71}.$$

В общем виде будет справедлива следующая формула для вычисления сквозной эмиссии:

$$M_{Cik} = M_{\Pi ik} + \sum_{i=1}^L \left(G_{ik} \cdot \sum_{j=1}^N P_{jk} \right) + \sum_{l=1}^M \left(M_{\Pi il} \cdot \sum_{j=1}^P P_{jl} \right), \quad (6)$$

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 равно 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 CO₂ от k -ого источника в i -ом переделе, l – номер вершины в i -ом переделе, у которой эмиссия процесса не равна нулю. Аналогично эмиссиям будем различать ТПЧ: процесса ТПЧ_П, транзитное ТПЧ_Т, сквозное ТПЧ_С. Они связаны соотношением:

$$\text{ТПЧ}_C = \text{ТПЧ}_П + \text{ТПЧ}_T. \quad (7)$$

ТПЧ равно эмиссии CO_2 , умноженной на постоянный коэффициент $K_{ВП}$. По этой причине из формулы (8) можно получить выражение для вычисления сквозных ТПЧ_{Cik} :

$$\text{ТПЧ}_{Cik} = K_{ВП} M_{Пik} + K_{ВП} \sum_{i=1}^L \left(G_{ik} \sum_{j=1}^N P_{jk} \right) + K_{ВП} \text{CO}_2 \sum_{l=1}^M \left(M_{Пil} \sum_{j=1}^P P_{jl} \right). \quad (8)$$

Введен показатель оценки интегральной эмиссии CO_2 процесса – удельный коэффициент эмиссии CO_2

$$\beta_{ДУ} = \frac{m_{ДУ}}{m_{\text{прод}}}, \quad (9)$$

равный результирующей массе образуемого CO_2 $m_{ДУ}$ на 1 т продукции $m_{\text{прод}}$. Значение этого коэффициента зависит от многих факторов. По этой причине можно говорить о множестве его значений на множестве технологических параметров. Далее анализируются средние значения этого коэффициента.

Предложена **классификация ТП** по механизмам образования эмиссии CO_2 .

Тип 1. Процессы, в которых происходит возгонка летучих фракций, используемых как топливо в этих же процессах (коксование).

Тип 2. В процессах типа 2 образование CO_2 происходит при окислении углерода топлива и при разложении компонентов шихты (известняка, доломита) под действием высокой температуры (обжиговые конвейерные машины).

Тип 3. Процессы, в которых сжигается топливо, часть углерода переходит в конечный продукт и разлагаются карбонаты Ca и Mg флюса (доменный процесс, Ромелт, Corex).

Тип 4. Процессы, в которых выгорает углерод из металла шихты, но топливо не используется (кислородно-конвертерное производство).

Тип 5. Процессы, в которых выгорает углерод из металла шихты и сжигается топливо (электросталеплавильное производство).

Тип 6. Процессы, в которых сжигается топливо (HyL-3, Midrex).

Таким образом, эмиссии CO_2 представлены в новой форме – интегральной. Выделены следующие классы эмиссий: прямая, косвенная, процесса, транзитная, сквозная. Выявлены типы процессов получения чугуна и стали по механизмам образования CO_2 .

Глава 4. Совершенствование методики анализа эмиссии CO_2 в процессах производства чугуна и стали

Каждому типу процесса соответствует конкретная ММ для вычисления эмиссии CO_2 .

ММ ТП типа 1. Процессы, в которых происходит возгонка летучих фракций из исходного сырья без доступа воздуха (коксование) и сжигание этих фракций с образованием прямых или косвенных эмиссий CO_2 . При сгорании всего образованного сухого или обратного коксового газа весь его углерод окисляется до CO_2 . Этот CO_2 будем считать эмиссией коксохимического производства, которая определяется массой углерода, содержащаяся в коксовом газе. Нештатные выбросы CO_2 , образующиеся при финишных процессах получения кокса, здесь не учитываются. Коксовый процесс характеризуется следующими относительными весо-

выми коэффициентами:

$$w_k = M_k/M_{ky} = (0,65-0,75);$$

$$w_{кг} = M_{кг}/M_{ky} = (0,12-0,15),$$

где M_{ky} – масса коксующегося каменного угля; M_k – масса кокса, полученного из этого угля; $M_{кг}$ – масса сухого коксового газа; $w_{кг}$ – коэффициент выхода сухого коксового газа из угля; w_k – коэффициент выхода кокса из угля. Масса CO_2 , образующаяся при сжигании массы $M_F = M_{кг}$ коксового газа, определяется из соотношения:

$$M_{G5} = 3,667 \cdot w_c \cdot M_F = 3,667 \cdot w_c \cdot \frac{w_{кг}}{w_k} \cdot M_{кг}. \quad (10)$$

На 1 000 кг коксового газа образуется CO_2 , масса которого определяется формулой

$$\beta_{DC5} = 3667 \cdot w_c \cdot \frac{w_{кг}}{w_k}, \text{ кг } CO_2/\text{т кокса}. \quad (11)$$

ММ ТП типа 2. Удельная масса CO_2 , образованного в процессе типа 2, определяется массой полностью окисленного углерода при использовании N видов топлива и массами карбонатов Ca и Mg:

$$M_{G1} = 3,667 \cdot \sum_1^N (C_I^P \cdot M_{FI}) + 0,44 \cdot m_{и} + 0,47 \cdot m_{д}, \quad (12)$$

где M_{G1} – масса образованного газа при сгорании всего топлива, т; $3,667 \approx 44/12$ – коэффициент, который задает количество массы образующегося газа на единицу сгораемого углерода (при сгорании CO этот коэффициент равен 1,571); C_I^P – массовая доля содержания (концентрация) углерода в I -ом топливе – отношение массы углерода M_{CI} к массе сгоревшего I -го топлива M_{FI} ; $m_{и}$ – масса известняка, т; $m_{д}$ – масса доломита, т.

ММ ТП типа 3. Представители процессов этого типа: доменный процесс, Corex, Ромелт. Формула для вычисления массы образовавшегося CO_2 в процессе типа 3:

$$M_{G1} = 3,667 \cdot \left(\sum_1^N C_I^P \cdot M_{FI} - C_{ч} \cdot m_{ч} \right) + 0,44 \cdot m_{и} + 0,47 \cdot m_{д}, \quad (13)$$

где $C_{ч}$ – массовая доля содержания углерода в чугуна; $m_{ч}$ – масса произведенного чугуна, т.

ММ ТП типа 4. Помимо CO_2 в КК при продувке кислородом образуется CO – горючий газ. CO уходит с дымовыми газами в систему очистки и дожигания или в газгольдеры, из которых потребляется как топливо. В этой связи допускаем, что весь выгоревший углерод исходной шихты образует CO_2 . Интегральная эмиссия CO_2 в ТП типа 4 определяется формулами

$$M_{G2} = 3,667 \cdot \Delta m_c, \quad (14)$$

$$\Delta m_c = m_{ш} (C_{ч} D_{ч} + C_{л} D_{л}) - C_{ст} m_{ст} = m_{ст} \left(\frac{C_{ч} D_{ч} + C_{л} D_{л}}{K_{п}} - C_{ст} \right), \quad (15)$$

$$K_{\Pi} = \frac{K_B [D_{\text{ч}}(1 - C_{\text{ч}} - Si_{\text{ч}} - Mn_{\text{ч}} - P_{\text{ч}} - S_{\text{ч}}) + D_{\text{л}}(1 - C_{\text{л}} - Si_{\text{л}} - Mn_{\text{л}} - P_{\text{л}} - S_{\text{л}})]}{1 - C_{\text{ст}} - Si_{\text{ст}} - Mn_{\text{ст}} - P_{\text{ст}} - S_{\text{ст}}} =$$

$$= \frac{K_B \sum D_i (1 - C_i - Si_i - Mn_i - P_i - S_i)}{1 - C_{\text{ст}} - Si_{\text{ст}} - Mn_{\text{ст}} - P_{\text{ст}} - S_{\text{ст}}}, \quad (16)$$

где M_{G2} – масса образованного CO_2 при выгорании углерода, т; Δm_c – количество выгоревшего углерода, т; $C_{\text{л}}$ – массовая доля содержания углерода в ломе; $m_{\text{л}}$ – масса лома в металлической шихте т; $C_{\text{ст}}$ – массовая доля содержания углерода в получаемой стали; $m_{\text{ст}}$ – масса получаемой стали, т; $D_{\text{ч}}$ – массовая доля чугуна в металлошихте; $D_{\text{л}}$ – массовая доля лома в металлошихте; $m_{\text{ш}} = m_{\text{ч}} + m_{\text{л}}$ – масса металлической шихты, т; $K_{\Pi} = m_{\text{ст}}/m_{\text{ш}}$ – коэффициент потерь, который учитывает потери исходной массы шихты от выгорания углерода, железа и других исходных составляющих загружаемой шихты; K_B – коэффициент перехода чистого железа из шихты в сталь; $D_i, C_i, Si_i, Mn_i, P_i, S_i$ – массовые доли i -ого компонента шихты, углерода, кремния, марганца, фосфора, серы в этом компоненте.

ММ ТП типа 5. В таком процессе CO_2 образуется от окисления углерода ПГ, электродов M_{G1} (12) и от выгорания углерода из исходных материалов (15) M_{G2} :

$$M_{G3} = M_{G1} + M_{G2}. \quad (17)$$

К этому типу относится процесс выплавки стали в ЭДП. Углерод в шихте содержится в скрапе, чугуне.

ММ ТП типа 6. Удельная масса CO_2 M_{G1} , образованного в ТП типа 6, определяется массой полностью окисленного углерода при использовании N видов топлива (12).

Таким образом, найдены ММ для вычисления интегральной эмиссии CO_2 различных типов ТП производства чугуна и стали.

Глава 5. Сравнительный энергетический и парниковый анализ технологий производства чугуна и стали

В расчетах для получения сравнимых результатов используются следующие данные по составу: чугуна: $C_{\text{ч}} = 4\%$, $Si_{\text{ч}} = 0,9\%$, $Mn_{\text{ч}} = 1\%$, $P_{\text{ч}} = 0,2\%$, $S_{\text{ч}} = 0,05\%$; лома: $C_{\text{л}} = 0,12\%$, $Si_{\text{л}} = 0,2\%$, $Mn_{\text{л}} = 0,5\%$, $P_{\text{л}} = 0,04\%$, $S_{\text{л}} = 0,05\%$; стали: $C_{\text{ст}} = 0,3\%$, $Si_{\text{ст}} = 0,2\%$, $Mn_{\text{ст}} = 0,3\%$, $P_{\text{ст}} = 0,04\%$, $S_{\text{ст}} = 0,05\%$. В качестве топлива рассматриваем каменный уголь тощий ($C^{\text{P}} = 71,9\%$, $Q_{\text{H}} = 27,63$ МДж/кг) и ПГ из Уренгойского месторождения ($C^{\text{P}} = 73,4\%$, $Q_{\text{H}} = 34,79$ МДж/м³ или $Q_{\text{H}} = 47,7$ МДж/кг, $\rho = 0,729$ кг/м³), кокс ($C^{\text{P}} = 85\%$, $Q_{\text{H}} = 29,1$ МДж/кг). Расходы энергоресурсов на ЭДП приняты одинаковыми для всех процессов: газа – 18 нм³; электроэнергии – 500 кВт·ч; кислорода – 45 нм³, кроме расчетов по ЭДП в процессе ЛП-В.

Проведен анализ аглодоменного передела и его основных процессов с точки зрения значений β и ТПЧ. В том числе отдельно был проанализирован процесс производства ванадиевого чугуна (ВЧ). Проведен анализ бескоксовых процессов по значениям β и ТПЧ (таблица 3). Проведены оценки значений сквозной эмиссии CO_2 и ТПЧ продуктов коксовых и бескоксовых производств (таблицы 4 и 5). В таблице 4 аббревиатурой ДП1_{ВЧ} обозначена ДП, загружаемая одним коксом, ДП2_{ВЧ} – ДП с использованием кокса и ПГ, ДП3_{ВЧ} – ДП с использованием кокса, ПГ и пылеугольного топлива (ПУТ). Эти ДП производят ВЧ, что обозначено индексом «вч».

Таблица 3 – Значения удельных коэффициентов эмиссии CO₂

Процесс	β _{ДУ}	ТПЧ, кг у. т./т прод.
Агломерационное производство	319	32,22
Производство железорудных окатышей	65	6,57
Коксохимическое производство	392	39,6
Доменное производство	1 408	142,2
Конвертерное производство	144	14,54
Электродуговое производство	88,9	8,98
Производство электроэнергии	1,084	0,109
Corex	2 669	269,57
Ромелт	3 745	378,25
Midrex	634	64,0
HyL-3	619	62,5
ЛП-В	1 285	259,0

Таблица 4 – Объемы интегральной сквозной эмиссии CO₂, значения ТПЧ_С по CO₂ и ТТЧ различных процессов при производстве стали

Переделы	Сквозная эмиссия на 1 т продукции		ТПЧ _С , кг у. т./т прод.	ТТЧ, кг у. т./т прод.	ТПЧ + ТТЧ + ТПЧ, кг у. т./т прод.	Ранг процесса по		
	Массовая, кг	Объемная, м ³				ТПЧ	ТТЧ	ТПЧ
ЭДП на ломе	1 021	516	103	441	544	1	1	1
HyL-3 + ЭДП	1 171	592	118	630	748	2	3-4	2
Midrex + ЭДП	1 226	636	124	639	766	3	8	4
ДП _{2ВЧ} + ЭДП	1 358	687	137	638	775	4	7	6
ДП _{3ВЧ} + ЭДП	1 379	698	139	623	762	5	2	3
ДП _{1ВЧ} + ЭДП	1 389	703	140	630	770	6	3-4	5
ДП + ЭДП	1 401	709	142	634	776	7	6	7
Corex + ЭДП	1 832	927	185	632	817	8	5	8
Ромелт + ЭДП	1 980	1 003	200	681	881	9	9	9
ДП _{2ВЧ} + КК	2 061	1 043	208	928	1 136	10	14	13-14
ДП _{3ВЧ} + КК	2 117	1 043	214	887	1 101	11	11	11
ДП _{1ВЧ} + КК	2 144	1 085	217	902	1 119	12	12	12
ДП + КК	2 166	1 096	219	917	1 136	13	13	13-14
ЛП-В	2 565	1 297	259	792	1 051	14	10	10

Для определения значений сквозной эмиссии CO₂ использовались модели в виде сигнальных графов (рисунок 4). На этих моделях внутри вершин в скобках приведены сигналы – значения интегральных эмиссий CO₂ процессов, а через косую черту – значения сквозной эмиссии – эмиссий продуктов.

Таблица 5 – Значения эмиссий CO₂, ТПЧ_С и ТТЧ различных металлургических процессов

Переделы	Сквозная эмиссия, кг на 1 т прод.	Отношение эмиссий процесса к сквозной эмиссии	ТПЧ _С , кг у. т. на т прод.	ТТЧ, кг у. т. на т прод.	ТППЧ, кг у. т. на т прод.	Ранг процесса по		
						ТПЧ	ТТЧ	ТППЧ
ЭДП на ломе	1 021	0,087	103	441	544	1	1	1
ЭДП с чугуном	1 401	0,064	142	634	776	4	2	2
HyL-3	1 044	0,593	105	770	875	2	3	3
Midrex	1 211	0,524	122	798	920	3	4	4
ДПЗ _{Вч} с ПУТ и ПГ	2 129	0,676	215	902	1 117	6	5	5
КК	2 166	0,066	219	917	1 136	8-9	6	7
ДП	2 170	0,649	219	936	1 135	8-9	9	6
ДП1 _{Вч}	2 160	0,684	218	919	1 137	7	7	8
ДП2 _{Вч} с ПГ	2 066	0,677	209	949	1 158	5	10	9
Corex	3 475	0,768	351	931	1 282	10	8	10
Ромелт	3 925	0,954	396	1 078	1 474	11	11	11

В статье Загайнова С. А. приведены данные по расходам ресурсов для двух ДП НТМК в течение девяти месяцев, работающим с вдуванием ПГ и ПУТ. Результаты обработки этих данных приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты статистической обработки данных на тонну чугуна по работе ДП НТМК с вдуванием ПГ и ПУТ

Параметры	ДП № 5	ДП № 6
Среднее значение ТТЧ, кг у. т./т чугу.	904,5	921,3
Дисперсия ТТЧ, (кг у. т./т чугу.) ²	315	886
Среднеквадратическое отклонение ТТЧ, кг у. т./т чугу.	17,8	29,8
Диапазон разброса ТТЧ, кг у. т./т чугу.	64,6	79,3
Среднее значение эмиссии CO ₂ процесса, кг/т чугу.	1 461,5	1 442,3
Дисперсия эмиссии CO ₂ процесса, (кг/т чугу.) ²	20,8	56,1
Среднеквадратическое отклонение эмиссии CO ₂ процесса, кг/т чугу.	4,6	7,5
Диапазон разброса эмиссии CO ₂ процесса, кг/т чугу.	48,5	72,5
Среднее значение сквозной эмиссии CO ₂ , кг/т чугу.	2 094	2 082
Дисперсия сквозной эмиссии CO ₂ , (кг/т чугу.) ²	548	1 454
Среднеквадратическое отклонение сквозной эмиссии CO ₂ , кг/т чугу.	23,4	38,1
Диапазон разброса сквозной эмиссии CO ₂ , кг/т чугу.	75,7	101

В результате анализа найдено, что тандем ДП + ЭДП характеризуется меньшим значением сквозной эмиссии CO₂, а ДП + КК – большим. С целью уменьшения эмиссии CO₂ в коксодоменном процессе целесообразно весь чугун перерабатывать в сталь в ЭДП. Однако, для переработки всего чугуна, выпущенного ДП за сутки, недостаточно одной ЭДП. Для решения этой задачи были рассмотрены

производительности различных сочетаний ДП, ЭДП и КК в сравнении с производительностями ДП различного объема (таблица 7). За базовый вариант принят дуплекс ДП + КК с 80 % чугуна в шихте КК, который имеет сквозной эмиссии 2,166 т/т стали. ЭДП загружались чугуном на 30 %. В КК поступал оставшийся чугун (от 75 до 85 %). Для полного заполнения объема КК увеличивали долю лома. Последний столбец таблицы указывает снижение сквозной эмиссии в системе ДП + КК + ЭДП + ... + ЭДП. При трех ЭДП 150 снижение сквозной эмиссии составляет более 18 %.

Таблица 7 – Результаты расчетов сочетания ДП, ЭДП и КК

Объем КК, т	ДП, т/сутки	Сталь, т/сутки	Чугун ЭДП, т/сутки	Чугун КК, т/сутки	Сквозная эмиссия CO ₂ ЭДП, т/сутки	Сквозная эмиссия CO ₂ КК, т/сутки	Сквозная эмиссия CO ₂ , т/сутки	Сквозная эмиссия т/стали	Снижение сквозной эмиссий, %
Две ЭДП 100									
400	10 800	18 560	1 728	9 072	8 064,00	24 947,52	33 011,52	1,78	17,89
Три ЭДП 100									
200	7 400	15 040	2 592	4 808	12 096,00	13 121,12	25 217,12	1,68	22,60
Четыре ЭДП 100									
160	7 400	16 640	3 456	3 944	16 128,00	10 729,18	26 857,18	1,61	25,49
200	8 100	17 920	3 456	4 644	16 128,00	12 730,80	28 858,80	1,61	25,66
300	10 800	21 120	3 456	7 344	16 128,00	19 995,84	36 123,84	1,71	21,04
Одна ЭДП 150									
300	8 100	13 920	1 296	6 804	6 048,00	18 710,64	24 758,64	1,78	17,89
Две ЭДП 150									
200	7 400	15 040	2 592	4 808	12 096,00	13 121,12	25 217,12	1,68	22,60
Три ЭДП 150									
160	8 100	18 080	3 888	4 212	18 144,00	11 367,02	29 511,02	1,63	24,65
300	10 800	22 560	3 888	6 912	18 144,00	18 967,68	37 111,68	1,65	24,06

Наименьшие значения сквозной эмиссии, ТПЧ, ТТЧ и ТТПЧ имеют процессы ЭДП на ломе, ЭДП с чугуном, НуL-3, Midrex. В двух последних процессах используется ПГ, в котором содержание углерода меньше, чем в каменном угле при одинаковой теплоте сгорания. По этой причине процессы НуL-3, Midrex характеризуются малыми значениями сквозной эмиссии и ТПЧ.

Альтернативные процессы Corex и Ромелт имеют худшие параметры по сравнению с ДП (таблица 3). Из таблицы 7 следует, что для уменьшения сквозной эмиссии целесообразно шире применять ЭДП при выплавке стали.

Из таблицы следует, что погрешности вычисления ТТЧ, эмиссии CO₂ процесса и сквозной эмиссии не превышают 8% при изменении расходов ресурсов для ДП.

Глава 6. Индикаторы устойчивого развития металлургических процессов, используемых для получения стали, и принципы ранжирования технологий

В индикаторах устойчивого развития используются следующие относитель-

ные параметры: себестоимость стали $y_2 = CC_i/30\,000$, удельная сквозная эмиссия CO_2 $y_1 = CЭ_i/3\,000$, энергоёмкость $y_3 = TTЧ_i/1\,000$. Индикатор определяется формулой

$$K_3 = \alpha_1 \cdot y_1 + \alpha_2 \cdot y_2 + \alpha_3 \cdot y_3. \quad (18)$$

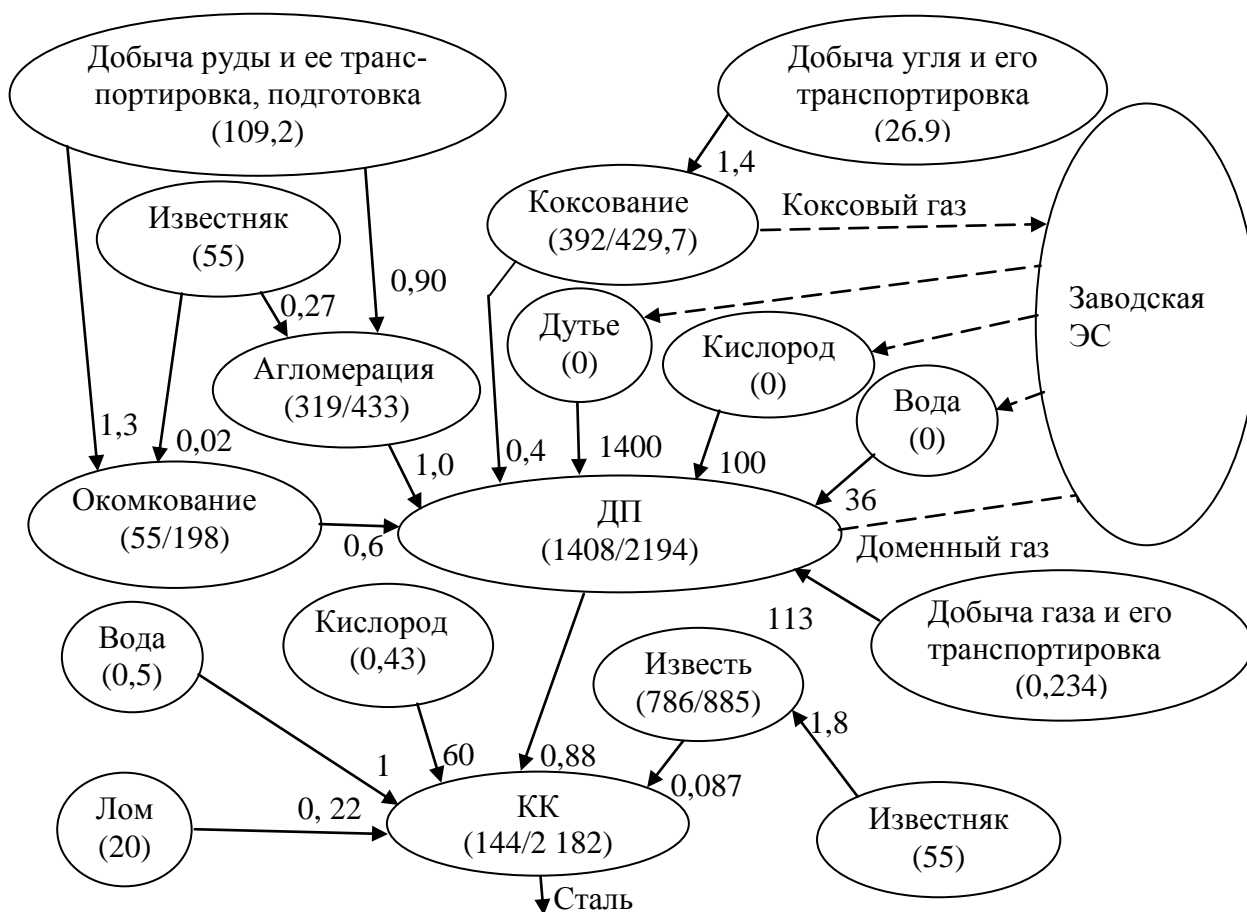


Рисунок 4 – Граф эмиссий CO_2 процессов и продуктов для коксодоменных процессов ДП + КК

Индикаторы вычислены при следующих значениях коэффициентов: $\alpha_1 = 0,3$; $\alpha_2 = 0,5$; $\alpha_3 = 0,2$ (оценке себестоимости дан приоритет). При этом $\min K_3$ характеризует предпочтительную технологическую цепочку, продукция которой будет наиболее конкурентоспособной. Результаты приведены в таблице 8.

Глава 7. Разработка новых схем агрегатов процесса ЛП-В

Схема запатентованного устройства для производства стали с использованием железорудного сырья и жидкого чугуна представлена на рисунке 5 (ЛП-В-2). Оно включает: ПЖВ, работающую в режиме газификации, ШП металлизации, ЭДП-1 и ЭДП-2, электростанцию (ЭС), кислородную станцию (КС). В ПЖВ подаются уголь и железорудное сырье, содержащее ванадий. ПЖВ имеет вход для подачи кислорода в верхние фурмы и подачи кислородно-воздушной смеси в фурмы, выход для слива чугуна, выход расход горячего восстановительного газа (ГВГ). В ШП металлизации поступают железорудные окисленные окатыши (ОО). ШП имеет вход для подачи ГВГ из ПЖВ, выход для выгрузки МО, выход отработанного газа. ЭС имеет вход для ввода отработанного газа из ШП, выход выработанной ЭС электрической энергии. С выхода КС подается кислород. Вход КС служит для ввода электроэнергии. ЭДП имеют входы для загрузки МО, для за-

ливки жидкого чугуна, для ввода электроэнергии. На выходе ЭДП образуется сталь.

Таблица 8 – Ранжирование процессов по значениям индикатора устойчивого развития K_s с учетом энергоёмкости стали

Технологическая цепь	Индикатор углеродного следа K	Себестоимость стали, руб.	ТТЧ, кг у. т./т стали	Приоритет по		
				K	себестоимости	ТТЧ
ЭДП на ломе	0,514	20 649	441	2	5	1
HyL-3 + ЭДП	0,511	18 963	630	1	1	2
Midrex + ЭДП	0,533	19 376	639	3	2	5
ДП + ЭДП	0,565	19 913	634	4	3	4
Corex + ЭДП	0,663	21 449	632	5-6	7	3
Ромелт + ЭДП	0,663	23 077	681	5-6	8	6
ДП + КК	0,694	19 983	917	7	4	8
ЛП-В	0,794	21 003	792	8	6	7

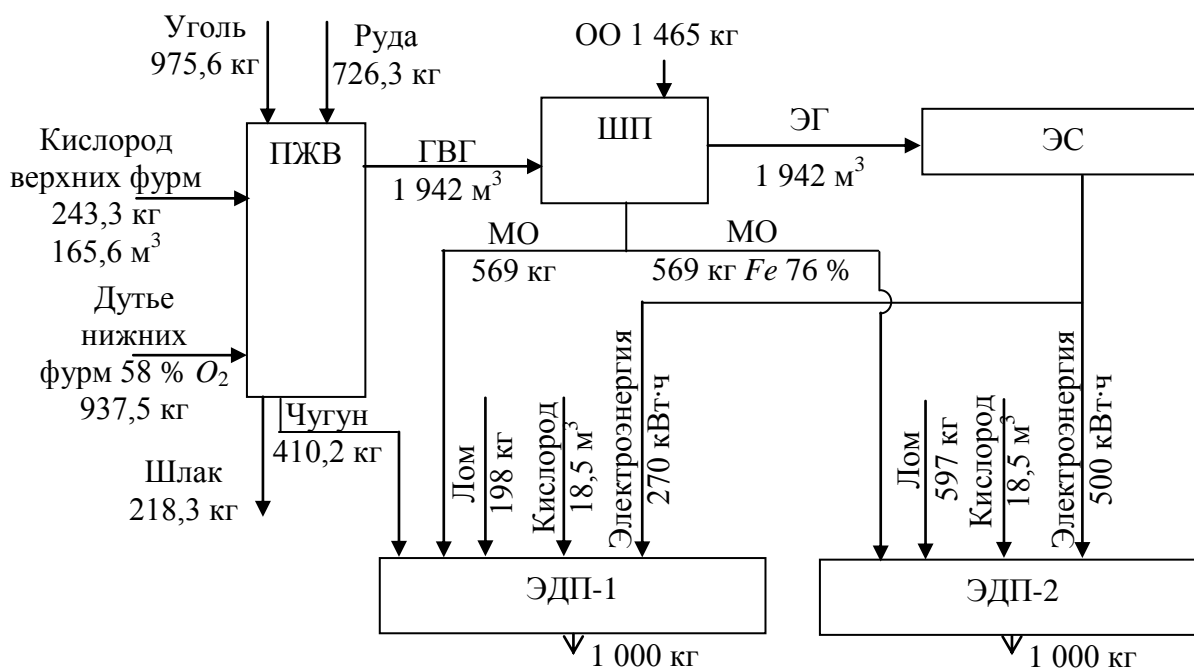


Рисунок 5 – Схема устройства для производства стали (ЛП-В-2) с использованием металлизированного железорудного сырья и жидкого чугуна

Таким образом, предложены комплексные параметры для выбора наилучших доступных технологий с учетом сквозной эмиссии, себестоимости и энергоёмкости ТТЧ стали.

Железо восстанавливается из его оксидов в шлаковой ванне ПЖВ углём. Через боковые фурмы ПЖВ подается дутьём с кислородом для барботажной ванны. От пиролиза угля образуется газ, содержащий CO, который дожигается над плавильной ванной до CO₂ и H₂O кислородом, подаваемым через фурмы верхнего ряда ПЖВ для обеспечения дополнительного тепла. Восстанавливаемое в жидкой ван-

не железо каплями науглероживаясь проходит на подину агрегата через зону спокойного шлака. Образующиеся ГВГ из ПЖВ поступают в ШП, где восстанавливают железо ОО, загружаемых в ШП. МО из ШП поступают в две ЭДП. В ЭДП-1 и ЭДП-2, что позволило устранить недостаток технологии ЛП-В – производство избыточных МО, которые нельзя загрузить в единственную ЭДП. Также, проблема образования CO₂ потребовала дополнительных исследований.

Запатентовано устройство производства легированной ванадием стали с использованием металлизированного железорудного сырья (ЛП-В-3) и проведены теплотехнические расчеты для реализации этого способа. Суть способа состоит в распределении МО, выходящих из ШП, на три потока: в две ЭДП и в агрегат ПЖВ, что уменьшает возможность вспенивания шлака. Состав этого устройства аналогичен описанному выше. В описании к заявке была исключена ЭС и добавлен деванадатор.

Расчеты сквозной эмиссии CO₂, ТПЧ, ТТЧ, ТТПЧ для запатентованных устройств свидетельствуют о преимуществах предложенных устройств по сравнению с процессами ЛП-В с использованием феррованадия. В таблице 9 для сравнения приведены данные по всем проанализированным процессам.

Таблица 9 – Значения сквозной эмиссии CO₂, ТПЧ_С и ТТЧ

в различных сочетаниях металлургических переделов производства стали

Переделы	Сквозная эмиссия, кг на т прод.	ТПЧ _С , кг у. т. на т прод.	ТТЧ, кг у. т. на т прод.	ТТПЧ, кг у. т. на т прод.	Ранг процесса по			Сквозная эмиссия /ТТЧ
					ТПЧ	ТТЧ	ТТПЧ	
ЭДП на ломе	1 021	103	441	544	1	1	1	2,32
HyL-3 + ЭДП	1 171	118	630	748	2	3	2	1,86
Midrex + ЭДП	1 226	127	639	766	3	6	4	1,97
ДПЗ _{ВЧ} + ЭДП	1 379	139	623	762	4	2	3	2,22
ДП + ЭДП	1 401	245	634	878	5	5	5	2,21
Corex + ЭДП	1 832	320	632	952	6	4	6	2,90
Ромелт + ЭДП	1 980	346	681	1 027	7	7	9	2,91
ДПЗ _{ВЧ} + КК	2 117	214	887	1 101	8	11	10	2,39
ДП + КК	2 166	219	917	1 136	9	12	12	2,36
ЛП-В-3 средние значения	2 245	227	764	991	10	9	8	2,27
ЛП-В-2 средние значения	2 376	240	862	1 102	11	10	10	2,16
ЛП-В	2 565	259	632	958	12	8	7	4,05
Процесс с легированием FeV	3 254	568	1 415	1 983	13	13	13	2,30

Глава 8. Разработка алгоритмов вычисления сквозных эмиссий.

Алгоритмы основаны на использовании электронных таблиц типа Excel. Та-

кие таблицы позволяют наглядно представить графы эмиссий процессов производства чугуна и стали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Усовершенствована методика СЭА и разработана методика парникового анализа процессов производства чугуна и стали введением параметров, преобразующих экономические показатели в энергетические: энергетического эквивалента АО в форме ТАЧ и введением энергетического эквивалента сквозной эмиссии CO_2 в форме ТПЧ. ТПЧ разделено на три типа: ТПЧ_П, ТПЧ_Т и ТПЧ_С. Выявлены связи между ТТЧ и ТПЧ. Оценена сквозная энергоёмкость ряда бескоксowych металлургических процессов: твердофазных с получением МО, в том числе ванадийсодержащих; жидкофазных с получением чугуна и последующего получения стали в ЭДП или в КК. При этом уточнена энергоёмкость отдельных составляющих процессов. Выявлено, что альтернативные бескоксowych процессы по уровню энергоёмкости получаемой стали с использованием ЭДП вполне конкурентоспособны с традиционным аглодоменным процессом, а в случае эффективного использования ВЭР даже его превосходят.

2. В результате анализа ТП по производству чугуна и стали предложена классификация металлургических ТП на основе механизмов образования интегральной эмиссии CO_2 процесса с целью разработки формул – ММ – для вычисления значений этих эмиссий. Выделено шесть типов металлургических процессов. Каждому типу процесса соответствует конкретная ММ.

3. Разработаны методики определения интегральных сквозной эмиссии парникового газа – CO_2 – по количеству сгоревшего углерода в топливе, выгоревшего углерода из шихты, разложившихся карбонатов Са и Mg – с целью проведения сравнения различных сочетаний металлургических процессов, на выходе которых получается сталь.

4. Предложена и применена методика для оценки индикаторов устойчивого развития по углеродному следу – по сквозной эмиссии CO_2 – различных сочетаний переделов производства чугуна и стали, на выходе которых получается сталь. В основу методики положены формулы и компактная табличная модель для вычисления себестоимости сочетаний переделов. Приведено сравнение различных процессов по значениям индикаторов по углеродному следу, энергоёмкости и себестоимости продукции и найдены предпочтительные процессы.

5. Разработаны и запатентованы новые устройства для производства стали с использованием металлизированного железорудного сырья и жидкого чугуна (две полезные модели).

6. Наименьшими значениями сквозной эмиссии CO_2 (углеродного следа) при производстве стали обладают тандемы НуL-3 + ЭДП и Midrex + ЭДП. Тандем ДП + ЭДП с точки зрения углеродного следа лучше традиционного тандема ДП + КК.

7. Установлено, что по сквозной эмиссии CO_2 разработанные устройства ЛП-В занимают 10-ое и 11-ое места среди исследованных тандемов. Процесс ЛП-В имеет ранг 12. Таким образом, разработанные устройства имеют меньшую сквозную эмиссию CO_2 по сравнению с ЛП-В. При этом на их выходе получается качественная ванадиевая сталь, что свидетельствует о достоинствах этих

устройств. Установлено, что процессы получения легированной ванадием стали с использованием феррованадия занимают последнее место по энерго-парниковым параметрам из 13-ти возможных. Данное обстоятельство свидетельствует о преимуществах технологии ЛП-В в схемах процессов, изложенных в данной работе.

8. Результаты работы внедрены на ОАО «Уралтрансмаш» при разработке проекта реконструкции литейного цеха ПТК 820. Материалы работы использовались в ООО «Уральский центр энергосбережения и экологии» при решении вопросов энергосбережения и экологической безопасности и на ПАО «Синарский трубный завод» в части определения энергоёмкости продукции и оценки углеродного следа. Методики расчетов CO_2 в процессах производства чугуна и стали внедрены в учебном процессе кафедры «Автоматика» ИРИТ-РтФ УрФУ.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования. В данной работе все вычисления сквозной эмиссии CO_2 , ТПЧ, ТТЧ проводились на основе усредненных данных ТП. Представляет интерес выполнить эти расчеты по данным ТП, полученных при различных режимах работы процессов (агрегатов), найденных расчетным путем или путем обзора мировых источников, с целью оценки статистических параметров ТПЧ и ТТЧ. Разработка темы исследования связана с дальнейшим усовершенствованием рассматриваемых ТП и их более широким внедрением в практику с использованием разработанных в диссертационной работе методик оценки энергоэкологических параметров процессов.

Основные публикации по теме диссертационной работы

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Лаптева, А. В. Энергоэкологический анализ выплавки никелевого штейна в шахтной печи и печи Ванюкова / З. Г. Салихов, В. Г. Лисиенко, А. Е. Пареньков, Ф. Л. Скуридин, А. В. Лаптева // Цветные металлы. – 2008. – № 1. – С. 101–104 (0,375 п. л. / 0,075 п. л.)

2. Лаптева, А. В. Энергетические возможности бескоксовых технологий производства чёрных металлов / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, А. В. Лаптева // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 2008. – № 9. – С. 56–61 (0,625 п. л. / 0,208 п. л.)

3. Лаптева, А. В. Оценка энергоэффективности альтернативных бескоксовых металлургических технологий / В. Г. Лисиенко, А. Е. Пареньков, А. В. Лаптева // Сталь. – 2009. – № 2. – С. 72–77 (0,625 п. л. / 0,208 п. л.)

4. Лаптева, А. В. Сравнительный эколого-парниковый анализ альтернативных бескоксовых процессов производства чугуна и стали / В. Г. Лисиенко, Ю. Н. Чесноков, А. В. Лаптева // Металлург. – 2011. – № 7. – С. 40–45 (0,625 п. л. / 0,208 п. л.)

5. Лаптева, А. В. Математические модели косвенных оценок эмиссии CO_2 в некоторых металлургических процессах / Ю. Н. Чесноков, В. Г. Лисиенко, А. В. Лаптева // Сталь. – 2011. – № 8. – С. 74–77 (0,375 п. л. / 0,125 п. л.)

6. Лаптева, А. В. Разработка графов эмиссии диоксида углерода металлургическими предприятиями / Ю. Н. Чесноков, В. Г. Лисиенко, А. В. Лаптева. // Металлург. – 2012. – № 12. – С. 23–26 (0,375 п. л. / 0,125 п. л.)

7. Лаптева, А. В. Анализ возможности снижения расходов топлива, эмиссии

диоксида углерода и получения углеродных инвестиций на примере предприятий Свердловской области / В. П. Ануфриев, В. Г. Лисиенко, А. П. Кулигин, А. В. Лаптева, Ю. Н. Чесноков, Ю. К. Маликов, Т. П. Рыжова // *Металлург.* – 2013. – № 4. – С. 24–29 (0,625 п. л. / 0,089 п. л.)

8. Лаптева, А. В. Оценка углеродного следа при выплавке стали в электродуговой печи / Ю. Н. Чесноков, В. Г. Лисиенко, А. В. Лаптева // *Металлург.* – 2013. – № 9. – С. 23–26 (0,375 п. л. / 0,125 п. л.)

9. Лаптева, А. В. Исследование конкурентоспособности по углеродному следу продукции различных сочетаний металлургических переделов / В. П. Ануфриев, В. Г. Лисиенко, Н. В. Стародубец, Ю. Н. Чесноков, А. В. Лаптева // *Экономика и предпринимательство.* – 2013. – № 10. – С. 312–316 (0,5 п. л. / 0,1 п. л.)

10. Лаптева, А. В. Анализ энергоёмкости и эмиссии CO₂ при различных сочетаниях коксовых и бескоковых процессов при производстве стали / В. Г. Лисиенко, Ю. Н. Чесноков, А. В. Лаптева // *Металлург.* – 2015. – № 5. – С. 18–24 (0,75 п. л. / 0,25 п. л.)

11. Лаптева, А. В. Сравнительная эмиссия парникового газа CO₂ в переделах черной металлургии / В. Г. Лисиенко, Ю. Н. Чесноков, В. В. Луговкин, А. В. Лаптева // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 2015. – № 9. – С. 625–629 (0,5 п. л. / 0,125 п. л.)

12. Лаптева, А. В. Показатели конкурентоспособности продукции различных сочетаний металлургических переделов с учётом их углеродного следа / В. Г. Лисиенко, В. В. Криворотов, Д. Б. Берг, Ю. Н. Чесноков, А. В. Лаптева // *Вестник УрФУ. Серия экономика и управление.* – 2015. – № 6. – С. 868–884 (2 п. л. / 0,4 п. л.)

Патенты:

13. Пат. 132076 Российская Федерация. Устройство для производства стали с использованием металлизированного железорудного сырья и жидкого чугуна / Чесноков Ю. Н., Лисиенко В. Г., Лаптева А. В.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина". – № 2012RU-U145581; заявл. 25.10.12; опубл. 10.09.13, Бюл. № 69. – 96 с. (1,125 п. л. / 0,375 п. л.)

14. Пат. 156072 Российская Федерация. Устройство выплавки легированной ванадием стали с использованием металлизированного железорудного сырья / Чесноков Ю. Н., Лисиенко В. Г., Лаптева А. В.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина". – № 2015RU-U111966; заявл. 01.04.15; опубл. 27.10.15, Бюл. № 79. (1,125 п. л. / 0,375 п. л.)

Другие публикации:

15. Лаптева, А. В. Энергетические проблемы развития технологий производства чёрных металлов / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, А. В. Лаптева // *Бюллетень научно-технической и экономической информации «Чёрная металлургия».* – 2008. – № 8. – С. 60–67 (0,875 п. л. / 0,292 п. л.)

16. Лаптева, А. В. Сравнительная энергоэффективность технологических процессов / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, А. В. Лаптева // *Труды V Международной научно-практической конференции «Энергосберегающие*

технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология. Безопасность технологических процессов». – М.: МИСиС, 2010. – С. 126 (0,125 п. л. / 0,042 п. л.)

17. Лаптева, А. В. Сравнительный эколого-парниковый анализ альтернативных бескоксовых процессов / В. Г. Лисиенко, А. В. Лаптева // Труды V Международной научно-практической конференции «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология. Безопасность технологических процессов». – М.: МИСиС, 2010. – С. 127–133 (0,75 п. л. / 0,375 п. л.)

18. Лаптева, А. В. Сравнительный эколого-парниковый анализ металлургических бескоксовых процессов / В. Г. Лисиенко, А. В. Лаптева // Материалы IX Международного симпозиума «Проблемы экоинформатики». – М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2010. – С. 113–116 (0,375 п. л. / 0,188 п. л.)

19. Лаптева, А. В. Энергоёмкость и энергоэкологоёмкость бескоксовых металлургических процессов / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, А. В. Лаптева // Материалы IX Международного симпозиума «Проблемы экоинформатики». – М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2010. – С. 144–147 (0,375 п. л. / 0,125 п. л.)

20. Лаптева, А. В. Методика расчета эмиссии диоксида углерода коксохимического процесса / Ю. Н. Чесноков, В. Г. Лисиенко, А. В. Лаптева // Сборник научных трудов XVI Международной конференции «Теплотехника и энергетика в металлургии». – Днепропетровск: НМетАУ, 2011. – С. 215–217 (0,25 п. л. / 0,083 п. л.)

21. Лаптева, А. В. Оценка эмиссии диоксида углерода по технологическому топливному числу / Ю. Н. Чесноков, В. Г. Лисиенко, А. В. Лаптева // Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции «Инженерная экология». – М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2011. – С. 37–40 (0,375 п. л. / 0,125 п. л.)

22. Лаптева, А. В. Развитие методики вычисления эмиссии диоксида углерода металлургическими предприятиями / В. Г. Лисиенко, Ю. Н. Чесноков, А. В. Лаптева // Материалы Международного симпозиума «Инженерная экология – 2013». – М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2013. С. 143–146 (0,375 п. л. / 0,125 п. л.)

23. Лаптева, А. В. Энергоёмкость и эмиссия CO₂ различных сочетаний переделов при производстве стали / В. Г. Лисиенко, Ю. Н. Чесноков, А. В. Лаптева // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – № 6. – С. 105–111 (0,75 п. л. / 0,25 п. л.)

24. Лаптева, А. В. Технологии обеспечения энергоэкологической эффективности черной металлургии / Я.М. Щелоков, В.Г. Лисиенко, Ю.Н. Чесноков, А. В. Лаптева // Материалы XII Международного симпозиума «Инженерная экология – 2015». – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2015. – С. 125–128 (0,375 п. л. / 0,094 п. л.)