

На правах рукописи



Казakov Роман Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ И СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ РОССИИ

Специальность 05.16.07 – Metallургия техногенных и вторичных ресурсов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2013

Диссертационная работа выполнена на кафедре экологического мониторинга и прогнозирования ФГБОУ ВПО «Российский университет дружбы народов».

Научный руководитель:

доктор химических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Российский университет
дружбы народов»

Зволинский Валентин Петрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор,
ЗАО «Калвис»

Кальнер Вениамин Давыдович

кандидат технических наук,
ООО УК «Металлоинвест»

Мишин Юрий Петрович

Ведущая организация:

**ФГУП «Центральный научно-
исследовательский институт черной
металлургии им. И.П.Бардина»**

Защита состоится «27» июня 2013 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.02 при Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 6, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения) просьба направлять по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, Ученый Совет. Копии отзывов можно присылать по факсу: (495) 955-00-94, а также на email: rakazakov@gmail.com.

Автореферат разослан 17 мая 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.132.02, кандидат технических наук,
доцент



Колтыгин А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Повышение энергетической эффективности и снижение негативного воздействия на окружающую среду, в т.ч. сокращение выбросов парниковых газов, является одним из приоритетных направлений развития металлургической промышленности России, установленных Стратегией развития отрасли на период до 2020 г.

Современное состояние черной металлургии страны характеризуется высокой энергоемкостью (на 15-20% выше передовых зарубежных стран), сохранением некоторых неэффективных производственных мощностей и значительными выбросами парниковых газов (более 5,2% выбросов по стране или более 114 млн т в год).

Сокращение выбросов следует рассматривать в комплексе с решением других важных задач: модернизация и технологическое обновление предприятий, повышение энергоэффективности, энерго- и ресурсосбережение, повышение качества продукции и ее конкурентоспособности. Исследования в данном направлении являются актуальными.

Целью диссертационной работы являлось исследование возможности повышения энергетической эффективности и сокращения выбросов парниковых газов в черной металлургии России.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Анализ теоретических и методологических аспектов проблемы повышения энергоэффективности и снижения выбросов парниковых газов.
2. Совершенствование производственного мониторинга и методологических подходов к комплексной оценке выбросов парниковых газов на предприятиях черной металлургии.
3. Исследование возможности сокращения выбросов парниковых газов и повышения энергоэффективности при различных подходах к модернизации, техническому и технологическому развитию предприятий черной металлургии.
4. Прогноз выбросов парниковых газов для различных сценариев развития черной металлургии России на период до 2020 г.

Научная новизна диссертационной работы определяется следующими результатами.

1. На основе термодинамических расчетов показана возможность вторичного образования метана (CH_4) в колошниковом газе доменных печей в верхней части шахты доменной печи при температуре ниже 1000°C .
2. Установлен механизм вторичного образования CH_4 в результате взаимодействия водорода (H_2) с углеродом кокса, CO , CO_2 , H_2O доменного газа. Концентрация CH_4 может составлять от 0,2 до 1,3 об.% в зависимости от используемых видов топлива, обогащения дутья кислородом, температуры выхода колошникового газа и избыточного давления.

3. Развита методика оценки жизненного цикла изделия и анализа экобалансов металлургических предприятий в части комплексной оценки выбросов парниковых газов и изучения возможности их снижения. Введено понятие *интегральный показатель выбросов парниковых газов* для анализа выбросов, связанных с производством данного вида продукции на всех стадиях технологической цепочки и за пределами металлургического предприятия.

4. Разработаны сценарные прогнозы выбросов парниковых газов в черной металлургии России на период до 2020 г. На основе составленных прогнозов показано, что совершенствование существующей схемы металлургического производства, предусмотренное Стратегией развития отрасли (снижение энергоемкости на 20-22%, ресурсоемкости на 17%, увеличение доли электростали до 39%) позволит в перспективе стабилизировать рост выбросов парниковых газов на уровне 125-130 млн т CO₂/год. Снижение выбросов в отрасли с учетом ожидаемого роста производства до 80 млн т проката к 2020 г. может быть достигнуто только при дополнительном увеличении полезного использования вторичных энергетических ресурсов (в первую очередь, конвертерного газа) и применении технологий внедоменного производства железа при развитии электросталеплавильного производства.

Практическую значимость имеют следующие результаты диссертационной работы:

1. Разработана основа производственной системы мониторинга выбросов парниковых газов в черной металлургии, включающая процедуры идентификации источников, методы определения выбросов, сбора данных и выполнения расчетов, подготовки отчетности, обеспечения и контроля качества.

2. Определены удельные выбросы CH₄ в атмосферу в результате потерь доменного газа и его неполного окисления при горении, которые могут составлять от 0,008 до 0,558 кг/т чугуна. Средний уровень выбросов при производстве чугуна в России в 2010 г. составил по результатам расчетов около 5,5 тыс. т CH₄ или 115 тыс. т CO₂-эквивалента.

3. Рассчитаны значения коэффициентов выбросов CO₂ и содержания углерода для основных видов топлива, используемых на металлургических предприятиях России (природный газ, коксовый газ, доменный газ, кокс, уголь), с учетом их физико-химических характеристик.

4. Предложена методика расчета интегрального показателя выбросов парниковых газов, основанная на сквозной оценке расходов сырья, энергоресурсов, выявлении положительных и отрицательных эффектов выбросов в пределах и за границами металлургического предприятия.

5. Разработан программный комплекс «Информационная система инвентаризации и мониторинга парниковых газов» на базе СУБД SQL Server для автоматизации процессов мониторинга и оптимизации управления технологическими процессами.

6. Выполнена количественная оценка возможности повышения энергоэффективности и сокращения выбросов парниковых газов на металлургических предприятиях для двух основных направлений деятельности: рациональное использование топливно-энергетических ресурсов и сырья; совершенствование технологической структуры производства.

7. Построены диаграммы зависимости энергоемкости и выбросов парниковых газов при выплавке стали с использованием железа внедоменных процессов, позволяющие определять технологические условия выплавки стали и минимальную долю утилизации вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), при которых обеспечивается снижение выбросов парниковых газов и энергопотребления для конкретного предприятия или отрасли в целом. Показано, что эффективность технологий внедоменного получения железа и выплавки стали зависит от степени использования вторичных ресурсов: эффективности утилизации ВЭР и использования стального скрапа при выплавке стали.

Результаты диссертации могут быть применены в следующих направлениях:

– организация производственного и отраслевого мониторинга выбросов парниковых газов, отвечающего требованиям международных стандартов и рекомендаций, с использованием выполненной классификации источников выбросов, обобщенных методов выполнения расчетов, рассчитанных коэффициентов выбросов, рекомендаций по организационному и информационно-аналитическому обеспечению мониторинга;

– выбор наиболее эффективных подходов к повышению энергетической и экологической эффективности на каждом переделе и по предприятию в целом, а также объективное сравнение экологической эффективности предприятий с различной структурой производства на основе применения интегрального показателя выбросов парниковых газов;

– формирование и реализация отраслевой и корпоративной политики в области энергосбережения и снижения негативного воздействия на окружающую среду с учетом выявленных закономерностей и результатов сценарных прогнозов выбросов.

Личное участие автора. Основные результаты диссертационной работы получены лично автором под руководством д.х.н., проф. Зволинского В.П.

Достоверность результатов диссертационной работы основывается на применении надежных источников информации, статистических данных и математических методов их обработки, подтверждена совпадением расчетных значений с инструментальными данными, а также положительным опытом внедрения и апробацией результатов диссертации.

Результаты диссертации использованы в следующих работах: 1. НИР Министерства промышленности и торговли Российской Федерации на тему «Оценка эмиссии парниковых газов металлургическими предприятиями России и их перспективные возможности по сокращению выбросов парниковых газов в посткиотский период»; 2. Проект «Реконструкция

металлургического производства ОАО «Челябинский металлургический комбинат»; 3. Проект «Реконструкция сталеплавильного производства ОАО «Ижсталь»; 4. Проект «Реконструкция сталеплавильного производства ОАО «Ашинский металлургический завод»; 5. Проект «Строительство и введение в действие Литейно-прокатного комплекса ОАО «ОМК-Сталь» по производству горячекатаного рулонного проката»; 6. Проекты ОАО «Запорожсталь»: «Реконструкция кислородно-компрессорного цеха», «Полезная утилизация доменного газа и отходящего тепла», «Повышение энергоэффективности сталеплавильного и агломерационного производств»; 7. Стандарт предприятия ОАО «Ашинский металлургический завод» СТП-058-51-2009 по мониторингу сокращений выбросов парниковых газов, утвержденный приказом технического директора от 17.11.2009; 8. Регламент Филиала ОАО «ОМК-Сталь» Р-175-2011 «Мониторинг сокращений выбросов парниковых газов», утвержденный главным инженером от 23.09.2011; 9. Стандарт предприятия ОАО «Запорожсталь» СТП № 8.2-13-10 по мониторингу сокращений выбросов парниковых газов, утвержденный приказом технического директора от 05.03.2010; 10. Программно-вычислительный комплекс «Информационно-аналитическая система инвентаризации и мониторинга выбросов парниковых газов».

Апробация. Результаты исследований докладывались на Международной конференции «Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии» (Москва, 2011-2012); Всероссийской конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва, 2008-2013); XI Международной научной конференции молодых ученых «Региональная наука» (Москва, 2010); Международной конференции «Экономические и экологические проблемы развития черной металлургии в условиях глобализации рынка» (Москва, 2009); Международной конференции «Глобальное изменение климата и углеродный рынок: проблемы решения, перспективы» (Москва, 2009); Международном семинаре «Прогнозы выбросов парниковых газов и климатическая политика России» (Москва, 2009).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 12 статьях, из них 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах по перечню ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Общий объем работы 188 страниц, включая 31 таблицу и 30 рисунков. При написании диссертации было использовано 298 литературных источников, из которых 67 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит необходимые общие сведения о диссертации, в том числе, ее актуальности, целях, задачах, научной новизне, практической значимости, внедрении результатов исследований и основных публикациях автора по теме диссертации.

В первой главе выполнен анализ законодательных, теоретических и методологических аспектов проблемы повышения энергоэффективности и снижения выбросов парниковых газов в черной металлургии России с учетом мирового опыта.

Современный уровень понимания климатических процессов Земли и взаимосвязи между наблюдаемым изменением климата и воздействием естественных и антропогенных факторов не является исчерпывающим. Межправительственная группа экспертов по изменению климата считает, что начавшееся с середины XX века повышение глобальной средней температуры с вероятностью более 90% вызвано деятельностью человека. Несмотря на имеющуюся неопределенность в научных данных, очевидна необходимость разработки мер по учету и предотвращению выбросов парниковых газов в энергоемких отраслях экономики, к которым относится и черная металлургия, т.к. снижение выбросов парниковых газов связано с решением комплекса экологических, технологических и энергетических проблем.

Анализ выбросов парниковых газов и энергопотребления в черной металлургии России и стран мира в период 1990-2010 гг. позволил выявить следующие закономерности:

- черная металлургия является одним из крупнейших источников выбросов парниковых газов России (114,1 млн т CO₂-экв. / год или более 5,2% от национальных выбросов парниковых газов и 7,1% от выбросов CO₂ по состоянию на 2010 г.), что определяется высокой энерго- и ресурсоемкостью отрасли;

- выбросы парниковых газов на тонну произведенной стали в России в 2010 г. (1,698 т CO₂/т) были ниже среднемирового уровня (1,8 т CO₂/т) на 5,6%, однако превышают на 46,6% средний уровень по развитым странам (1,158 т CO₂/т);

- сокращение удельных выбросов парниковых газов (на 7,7% в 2010 г. по сравнению с 1990 г.) и энергопотребления (на 11,2%) подтверждают положительные изменения в черной металлургии России, однако эти изменения происходят более низкими темпами, чем в среднем по развитым странам.

В диссертационной работе выполнена оценка выбросов парниковых газов по крупнейшим металлургическим предприятиям России (таблица 1), которая показывает структуру выбросов в отрасли и потенциал по их сокращению.

Таблица 1 – Выбросы парниковых газов на предприятиях черной металлургии России и мира в 2010 г.

№	Предприятие	Выбросы, тыс. т CO ₂ /год	Удельные выбросы, т CO ₂ /т стали
1	Магнитогорский металлургический комбинат	21 096	1,847
2	Череповецкий металлургический комбинат	18 970	1,714
3	Новолипецкий металлургический комбинат	18 802	2,030
4	Западносибирский металлургический комбинат	12 810	1,882
5	Челябинский металлургический комбинат	9 314	1,806
6	Нижнетагильский металлургический комбинат	8 467	2,207
7	Металлургический комбинат «Уральская сталь»	5 058	1,794
8	Оскольский электрометаллургический комбинат	3 104	0,949
9	Новокузнецкий металлургический комбинат	1 219	0,929
10	Всего в черной металлургии России ¹	113 682	1,698
11	Всего по миру ²	2 576 995	1,800

Анализ основных подходов к оценке энергетической и экологической эффективности производственных процессов (анализ тепловых КПД, эксергетический анализ, концепция интенсивного энергосбережения, сквозной энергетический анализ, энерго-экологический анализ, анализ экобалансов) позволил выделить основные направления совершенствования методологии комплексной оценки выбросов парниковых газов.

Анализ методологических подходов к производственному мониторингу выбросов парниковых газов российских ученых (Симонян Л.М., Юсфин Ю.С., Черноусов П.И., Неделин С.В., Леонтьев Л.И., Шевелев Л.Н., Потапочкин А.Н., Мустафин Р.М., Косырев К.Л.) показал, что на сегодняшний день отсутствует общепринятая методология мониторинга выбросов парниковых газов для предприятий черной металлургии России. Основные направления совершенствования производственного мониторинга включают: охват всех потенциальных источников выбросов и всех парниковых газов, образующихся на предприятиях черной металлургии; применение методологических подходов для определения выбросов парниковых газов на предприятиях черной металлургии России, соответствующих международным стандартам; уточнение коэффициентов выбросов парниковых газов для видов топлива и сырья, используемых на предприятиях черной металлургии России; разработка организационной структуры и способов автоматизации инвентаризации и мониторинга выбросов парниковых газов на уровне предприятий черной металлургии России.

¹ По данным Национального кадастра антропогенных выбросов парниковых газов Российской Федерации.

² По данным Мировой ассоциации производителей стали (Worldsteelassociation).

Во второй главе приведены результаты исследования в области совершенствования производственного мониторинга выбросов парниковых газов.

Многочисленные исследования, выполненные в области экологического мониторинга, позволили сформировать методологические подходы к учету выбросов парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) и определить возможные уровни выбросов по основным переделам черной металлургии. В диссертации:

– выполнена классификация источников выбросов парниковых газов в черной металлургии на три категории (источники выбросов от промышленных процессов, источники выбросов от сжигания топлива, источники косвенных выбросов);

– обобщены методы расчетного мониторинга выбросов парниковых газов для предприятий черной металлургии, соответствующие международным требованиям и обеспечивающие низкую степень неопределенности результатов мониторинга;

– рассчитаны средние значения и 95%-доверительный интервал коэффициентов выбросов парниковых газов и содержания углерода для основных видов топлива (природный газ, коксовый газ, доменный газ, кокс, уголь), используемых на металлургических предприятиях России с учетом физико-химических характеристик топлива.

Недостаточно изученным оставался вопрос о выбросах CH_4 в доменном производстве – крупнейшем источнике выбросов парниковых газов в черной металлургии. Выбросы CH_4 в доменном производстве могут возникать из следующих источников при наличии CH_4 в доменном газе: *утечки (потери) доменного газа* при загрузке шихты в доменные печи и распределении газа в газовых сетях; *неполное сгорание доменного газа* при использовании в тепло-технических агрегатах и сжигании на свече.

Опубликованные данные по химическому составу доменных газов, а также инструментальные замеры полного химического состава доменного газа на некоторых заводах, свидетельствуют о возможном содержании CH_4 в доменном газе в количестве до 1,4%.

Выделены следующие механизмы поступления метана в доменный газ:

1. *Поступление CH_4 в колошниковый газ из летучих кокса.* Летучие кокса, содержащие до 20% CH_4 , выделяются при температуре более 800°C и поступают в колошниковый газ. При этом содержание CH_4 в колошниковом газе может составить 0,08 - 0,1% (при расходе кокса 400-500 кг/т чугуна, содержании летучих 1,1%, среднем выходе доменного газа 1500 м³/т чугуна).

2. *Поступление CH_4 в колошниковый газ из топлива вдуваемого в горн печи.* Исследование горения топлива доменной печи указывают на то, что продуктами реакций в фурменной зоне являются только CO , H_2 , N_2 . Тем не менее, не следует исключать возможность попадания CH_4 топлива в колошниковый газ при неравномерном распределении газов по сечению печи и нарушении ровного хода печи.

3. Вторичное образование CH_4 в доменной печи. Вторичное образование CH_4 в результате взаимодействия компонентов газовой фазы печи и шихты не было ранее исследовано и предложено в настоящей диссертации для уточнения данных о возможных выбросах парниковых газов в черной металлургии.

Термодинамические расчеты равновесных концентраций веществ в доменной печи, выполненные с использованием программы HSC Chemistry 6.12, показывают возможность вторичного образования метана (CH_4) в колошниковом газе (рисунок 1).

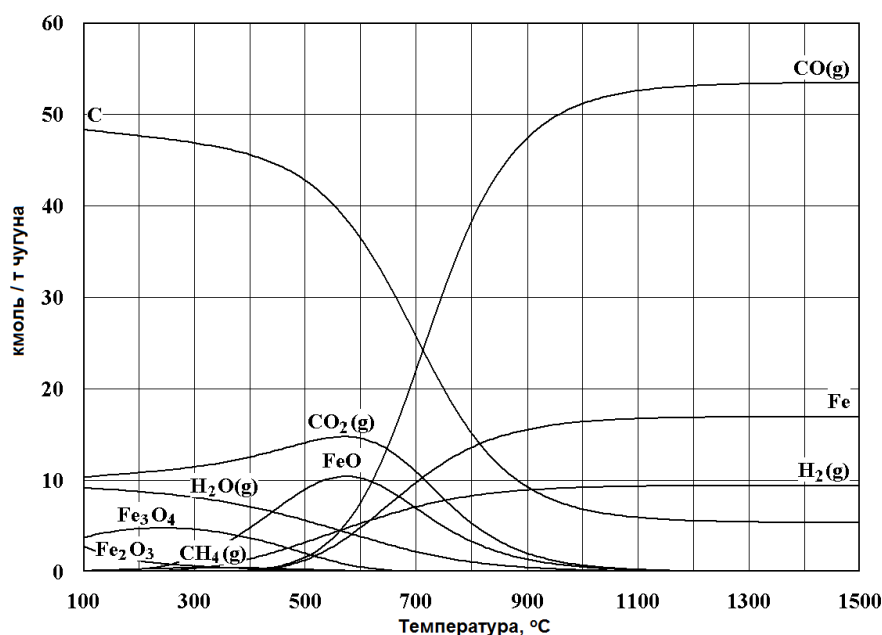


Рисунок 1 – Результаты моделирования равновесных концентраций веществ в доменной печи.

Концентрация CH_4 в колошниковом газе может составлять от 0,2 до 1,3 об.% в зависимости от температуры, давления, содержания кислорода в дутье, вдувания в горн водородсодержащего топлива: максимальные концентрации CH_4 наблюдаются в печи в зоне температур 300 - 360 °C; увеличение давления в печи ведет к увеличению концентрации CH_4 в размере около 0,3% на 1 атм.; вдувание в горн доменной печи природного газа ведет к увеличению концентрации CH_4 в колошниковом газе на 0,010 - 0,014% / м³ природного газа (рисунок 2); обогащение дутья кислородом обеспечивает снижение концентрации CH_4 в колошниковом газе до 0,4% / м³ кислорода и сдвиг температур максимальной концентрации CH_4 в сторону увеличения; применение пылеугольного топлива из углей с большим содержанием летучих (газовые, длиннопламенные), а также их смеси с углями высокой степени углефикации, ведет к образованию CH_4 в доменном газе в количестве более 0,1%.

Равновесные концентрации газов в доменной печи могут не достигаться в связи с высокой скоростью прохождения дутья, тем не менее содержание CH_4 в доменном газе следует ожидать при вдувании в печь природного газа и температуре выхода колошникового газа (150 - 400°C), соответствующей максимальным равновесным концентрациям CH_4 .

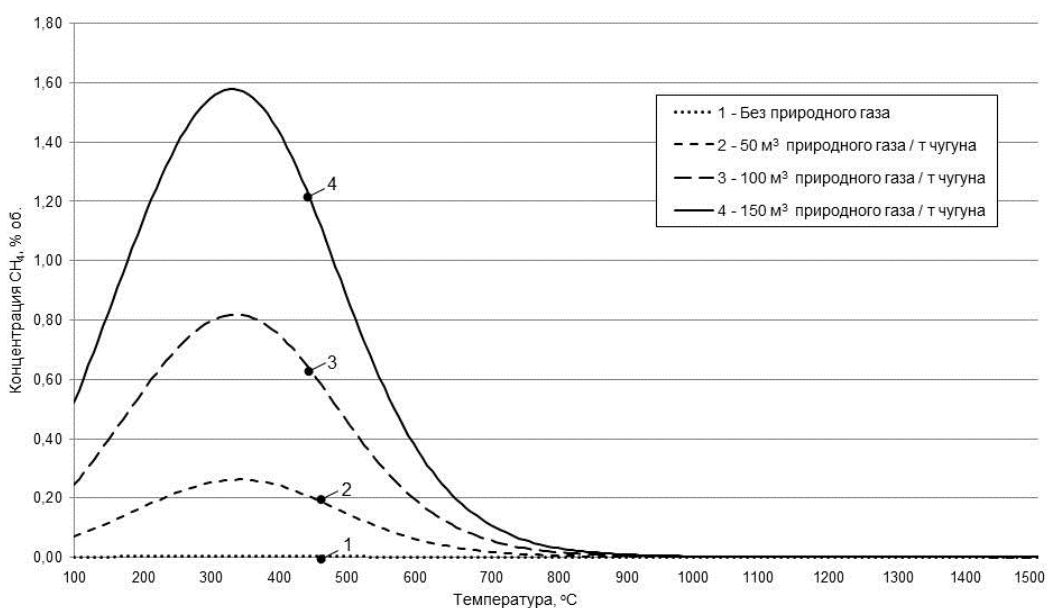


Рисунок 2 – Зависимость равновесной концентрации CH_4 в доменном газе от температуры и количества вдуваемого природного газа в горн печи.

Механизм вторичного образования CH_4 в шахте доменной печи вероятно связан с реакциями происходящими в газовой фазе между компонентами H_2 , CO , CO_2 , H_2O , а также реакциями с углеродом кокса при температуре $300\text{-}900^\circ\text{C}$. При понижении температуры ниже 300°C происходит снижение концентрации CH_4 (рисунок 2) в результате преобладающих реакций CH_4 с CO , CO_2 и O_2 с образованием H_2O , H_2 и выпадением сажистого углерода (таблица 2).

Таблица 2 – Характеристика некоторых реакций вторичного образования и разрушения CH_4 в доменной печи, $\log(K)$.³

№	Реакция	Температура, °C					
		0	200	400	600	800	1 000
1.1	$\text{C} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4$	10,04	3,88	1,19	- 0,33	- 1,32	- 2,01
1.2	$\text{CO} + 3\text{H}_2 = \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	28,16	11,32	4,23	0,30	- 2,20	- 3,92
1.3	$\text{C} + 2\text{CO} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CH}_4 + 2\text{CO}_2$	21,39	8,62	3,35	0,50	- 1,27	- 2,47
1.4	$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	22,49	8,95	3,15	- 0,12	- 2,22	- 3,70
1.5	$2\text{CO} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	33,83	13,69	5,31	0,72	- 2,17	- 4,15
2.1	$\text{CH}_4 + \text{CO} = 2\text{C} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$	10,29	2,41	- 0,34	- 1,50	- 2,03	- 2,27
2.2	$\text{CH}_4 + 2\text{CO} = 3\text{C} + 2\text{H}_2\text{O}$	26,19	11,00	4,89	1,60	- 0,44	- 1,82
2.3	$\text{CH}_4 + 2\text{CO} = 2\text{C} + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$	13,74	5,93	2,93	1,39	0,47	- 0,14
2.4	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 2\text{C} + 2\text{H}_2\text{O}$	2,40	1,19	0,77	0,55	0,42	0,32
2.5	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	153,21	88,38	62,12	47,90	38,96	32,83
2.6	$2\text{CH}_4 + \text{O}_2 = 2\text{CO} + 4\text{H}_2$	31,53	26,03	24,17	23,29	22,77	22,42

³ Константы равновесия реакций определены с использованием программы HSC Chemistry 6.12.

Удельные выбросы CH_4 в атмосферу в результате потерь доменного газа при загрузке шихты в доменные печи и распределении доменного газа могут составлять 0,008 - 0,467 кг/т чугуна при содержании CH_4 в доменном газе от 0,2 до 1,3%; удельные выбросы от неполного сгорания доменного газа – 0,008 - 0,091 кг/т чугуна. Средний уровень выбросов при производстве чугуна в России в 2010 г. по результатам расчетов составил около 5,5 тыс. т CH_4 или 115 тыс. т CO_2 -эквивалента.

Комплексный подход к оценке экологической и энергетической эффективности металлургического производства сформирован в рамках теории жизненного цикла изделия и концепции экобалансов, разработанной Юсфиным Ю.С., Черноусовым П.И., Неделиным С.В., Леонтьевым Л.И. С целью дальнейшего развития и совершенствования данных подходов в части учета выбросов парниковых газов в диссертации введен *интегральный показатель (ИПВ) выбросов парниковых газов*, под которым понимается объем выбросов парниковых газов (в тоннах эквивалента CO_2) при производстве единицы продукции с учетом прямых и косвенных эффектов выбросов от производства и использования сырья, топлива, энергоресурсов на металлургическом предприятии и за его пределами. Расчет ИПВ парниковых газов для производства металлопродукции предложено выполнять по нижеследующей формуле.

$$SE_{\text{CO}_2e,i} = \frac{E_{\text{CO}_2e,i}}{P_i} + \sum_{j=1}^n (SC_{j,i} \times SE_{\text{CO}_2e,j}) - \sum_{k=1}^m (SP_{k,i} \times ER_{\text{CO}_2e,k}), \quad (1)$$

где $SE_{\text{CO}_2e,i}$ - ИПВ производства i -вида металлопродукции, т CO_2 -экв./т; $E_{\text{CO}_2e,i}$ - выбросы при производстве i -вида продукции, т CO_2 -экв.; P_i - объем производства i -вида металлопродукции, т; $SC_{j,i}$ - удельный расход j -вида сырья, топлива и энергоресурсов на производство i -вида металлопродукции, ед./т (т/т, тыс. $\text{м}^3/\text{т}$, МВт·ч/т и т.д.); $SE_{\text{CO}_2e,j}$ - ИПВ производства j -вида сырья, топлива и энергоресурсов, т CO_2 -экв./ед.; $SP_{k,i}$ - использование за границами производства k -вида продукции, образующегося в процессе производства i -вида металлопродукции, обеспечивающее снижение выбросов парниковых газов, ед./т (т/т, тыс. $\text{м}^3/\text{т}$ и т.д.); $ER_{\text{CO}_2e,k}$ - коэффициент снижения выбросов при использовании k -вида продукции за границами производства, т CO_2 -экв./ед.

Методологическими особенностями расчета ИПВ в отличие от показателей, предложенных другими авторами (технологическое парниковое число – Лисиенко В.Г., Лаптева А.В., Чесноков Ю.Н.; показатели эффективности экобалансов – Юсфин Ю.С., Черноусов П.И., Неделин С.В., Леонтьев Л.И.; удельные выбросы – Шевелев Л.Н.), являются: расчет ИПВ для всех видов продукции основных и вспомогательных производств; сквозной, итерационный расчет ИПВ для готовой продукции; учет всех парниковых газов, характерных для металлургического производства (CO_2 , CH_4 , N_2O), и их вклада в глобальное потепление; отсутствие инструментальных измерений концентраций выбросов; выбросы ($E_{\text{CO}_2e,i}$) могут

быть определены в соответствии с любыми методологическими подходами; учет косвенных эффектов увеличения и снижения выбросов за границами металлургического предприятия; степень экологического воздействия предприятия на окружающую среду определяется ИПВ товарной продукции.

Принципиальная схема границ расчетов ИПВ парниковых газов производства металлопродукции приведена на рисунке 3.

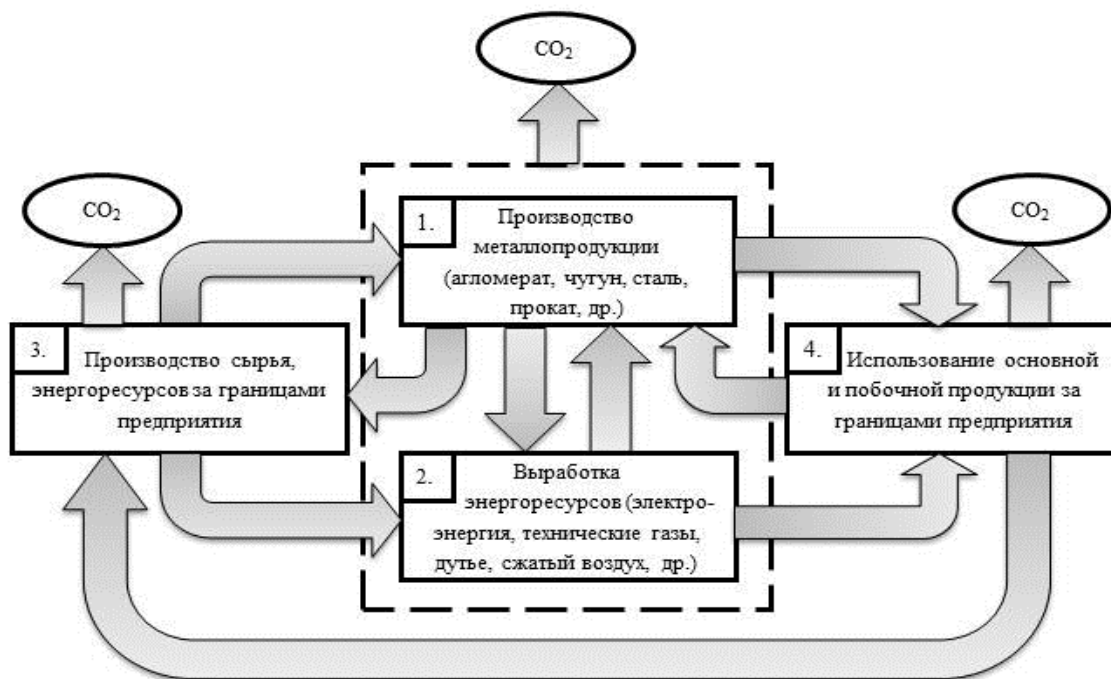


Рисунок 3 – Принципиальная схема границ расчета интегрального показателя выбросов парниковых газов, включая основные материальные и энергетические потоки.

Для структурирования элементов ИПВ выделены четыре группы источников:

1. выбросы основного производственного цикла, образующиеся в результате сжигания топлива и использования углеродсодержащего сырья при производстве металлопродукции;
2. выбросы вспомогательных производств от сжигания топлива и использования углеродсодержащего сырья для выработки энергоресурсов и вспомогательных материалов;
- 3 косвенные выбросы, связанные с увеличением ИПВ продукции и возникающие за границами предприятия при производстве сырья, топлива, энергоресурсов;
4. косвенные выбросы, связанные с уменьшением ИПВ продукции, – снижение выбросов за границами предприятия за счет применения продукции металлургии (например, применение доменного шлака при производстве цемента, использование ВЭР для выработки электроэнергии и др.).

ИПВ парниковых газов может применяться в следующих областях: сравнение эффективности различных технологических схем производства; сравнение экологической эффективности предприятий с различной структурой производства; выбор наиболее

эффективных методов повышения энергетической и экологической эффективности на каждом переделе и по предприятию в целом; производственный мониторинг выбросов; мониторинг сокращений выбросов при реализации проектов в рамках Киотского протокола.

В диссертационной работе предложена основа производственной системы мониторинга выбросов парниковых газов в черной металлургии, включающая процедуры идентификации источников, методы определения выбросов, сбора данных и выполнения расчетов, подготовки отчетности, обеспечения и контроля качества. Предлагаемая схема мониторинга отработана и внедрена автором в рамках реализации проектов в ОАО «Челябинский металлургический комбинат», ОАО «ОМК-Сталь», ОАО «Ижсталь», ОАО «Ашинский металлургический завод», ОАО «Запорожсталь».

С целью автоматизации учета выбросов парниковых газов и оптимизации управления технологическими процессами предложено использовать «Информационную систему инвентаризации и мониторинга парниковых газов», разработанную с участием автора. Функциональная схема разработанной информационно-аналитической системы (ИАС) приведена на рисунке 4. Основные элементы ИАС подробно описаны в диссертации. Разработанная ИАС внедрена на предприятиях ОАО «ГМК «Норильский никель».

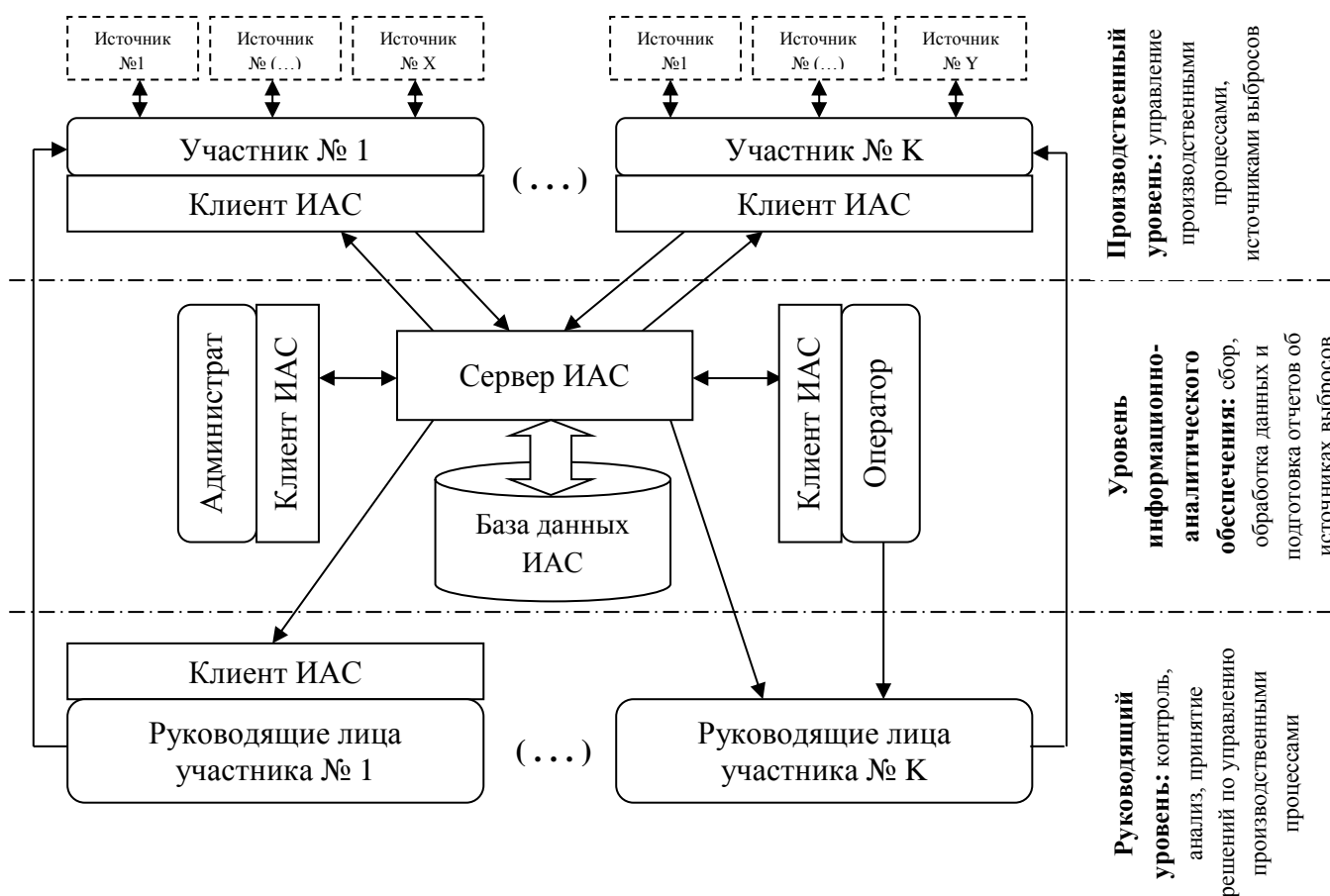


Рисунок 4 – Функциональная схема информационно-аналитической системы инвентаризации и мониторинга выбросов парниковых газов.

В третьей главе приведены результаты исследования возможности сокращения выбросов и повышения энергоэффективности для двух направлений деятельности.

Первое направление охватывает совокупность способов повышения эффективности использования и выработки топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и сырья, характеризующихся сохранением структуры производства основного вида металлопродукции (таблица 3).

Таблица 3 – Оценка эффективности методов рационального использования основных видов топливно-энергетических ресурсов и сырья.

№	Показатель	Сокращение выбросов	Энергосбережение
1	Снижение расхода топливных ресурсов		
1.1	Природный газ	1,806-1,911 т CO ₂ /тыс. м ³	33,00-34,26 ГДж/тыс. м ³
1.2	Коксовый газ	0,683-0,809 т CO ₂ /тыс. м ³	16,81-18,42 ГДж/тыс. м ³
1.3	Доменный газ	0,731-0,861 т CO ₂ /тыс. м ³	3,54-4,54 ГДж/тыс. м ³
1.4	Конвертерный газ	1,192-1,794 т CO ₂ /тыс. м ³	29,68-42,22 ГДж/тыс. м ³
1.5	Уголь энергетический	2,427-3,315 т CO ₂ /т	25,41-32,95 ГДж/т
1.6	Мазут	3,006-3,287 т CO ₂ /т	39,80-41,70 ГДж/т
2	Снижение расхода энергетических ресурсов		
2.1	Электроэнергия	0,274-1,048 т CO ₂ /МВт·ч	6,92-10,91 ГДж/МВт·ч
2.2	Тепловая энергия	0,174-0,502 т CO ₂ /Гкал	4,40-5,23 ГДж/Гкал
2.3	Кислород	0,080-0,340 т CO ₂ /тыс. м ³	5,39-6,35 ГДж/тыс. м ³
3	Снижение расхода сырья (произведенного)		
3.1	Чугун (производство)	1,818 - 2,303 т CO ₂ /т	15,80 - 20,27 ГДж/т
3.2	Сталь (производство)	0,697 - 2,495 т CO ₂ /т	2,94 - 19,64 ГДж/т
3.3	Кокс (производство)	0,520 - 0,595 т CO ₂ /т	3,28 - 4,37 ГДж/т
	Кокс (использование)	2,802 - 3,159 т CO ₂ /т	26,32 - 29,58 ГДж/т
3.4	Известь (производство)	1,009 - 1,847 т CO ₂ /т	3,20 - 9,20 ГДж/т
4	Полезное использование вторичных энергетических ресурсов		
4.1	Коксовый газ	0,984-1,709 т CO ₂ /тыс. м ³	16,81-18,42 ГДж/тыс. м ³
4.2	Доменный газ	0,220-0,381 т CO ₂ /тыс. м ³	3,54-4,21 ГДж/тыс. м ³
4.3	Конвертерный газ	0,531-0,922 т CO ₂ /тыс. м ³	7,10-10,10 ГДж/тыс. м ³
4.4	Отходящие газы и тепло	0,055-0,096 т CO ₂ /МДж	1,05-1,11 ГДж/ГДж
4.5	Избыточное давление	0,274-1,048 т CO ₂ /МВт·ч	6,92-10,91 ГДж/МВт·ч
5	Полезное использование вторичных ресурсов лома и отходов		
5.1	Стальной лом	0,761 - 2,351 т CO ₂ /т	11,31 - 20,69 ГДж/т
5.2	Шлак домен., конвертер.	0,475 - 0,887 т CO ₂ /т	1,22 - 4,42 ГДж/т

Эффект по сокращению выбросов и энергопотребления, достигаемый при модернизации и техническом перевооружении предприятий черной металлургии, не является эквивалентным, а определяется качеством используемых ресурсов, технологией производства и способом утилизации вторичных энергетических и материальных ресурсов.

Второе направление повышения энергоэффективности и сокращения выбросов парниковых газов связано с совершенствованием технологической структуры металлургического предприятия.

Исследована возможность сокращения выбросов парниковых газов и энергоемкости продукции при внедрении технологий внедоменного получения железа по сравнению с аглодоменным производством и выплавкой конвертерной стали для процессов жидкофазного восстановления (ПЖВ) и твердофазного восстановления (ПТВ). Оценка выбросов парниковых газов выполнялась в соответствии с предложенной методологией расчета ИПВ. Расчет энергоемкости выполнялся на основе положений методологии сквозного энергетического анализа (Лисиенко В.Г., 2008 г.). Анализ, полученных результатов, позволил выявить следующие закономерности:

- выбросы в процессах жидкофазного восстановления составляют 3,3-3,4 т CO₂/т чугуна (энергоемкость чугуна около 36 ГДж/т), что значительно выше выбросов при производстве доменного чугуна (около 1,9 т CO₂/т) и энергоемкости доменного чугуна (около 18 ГДж/т);

- процессы жидкофазного восстановления обладают высоким потенциалом образования ВЭР, утилизация которых компенсирует часть возникающих выбросов и позволяет достичь интегральных показателей при производстве стали до 0,8 т CO₂/т (энергоемкости 7-9 ГДж/т), что существенно ниже выбросов и энергоемкости для конвертерной стали 1,4 т CO₂/т (11 ГДж/т);

- выбросы парниковых газов при производстве железа в твердофазных процессах, существенно ниже по сравнению с доменным чугуном, и составляют 0,6-0,7 т CO₂/т; при производстве электростали с использованием железа прямого восстановления выбросы возрастают до 1 т CO₂/т стали за счет выбросов, связанных с выработкой электроэнергии;

- энергоемкость электростали, выплавленной с использованием железа твердофазных процессов, составляет до 15 ГДж/т, что является сопоставимым с конвертерной сталью при высокой доле утилизации ВЭР доменного передела.

Выполнена оценка эффективности производства стали с использованием чугуна процессов жидкофазного восстановления и железа прямого восстановления в зависимости от состава шихты электропечи и уровня утилизации ВЭР. Построенные диаграммы (рисунок 5 и 6) позволяют определять требования к уровню утилизации ВЭР и технологические условия для выплавки стали (состав шихты), при которых достигается сокращение выбросов парниковых газов и снижение энергоемкости готовой продукции относительно заданного уровня.

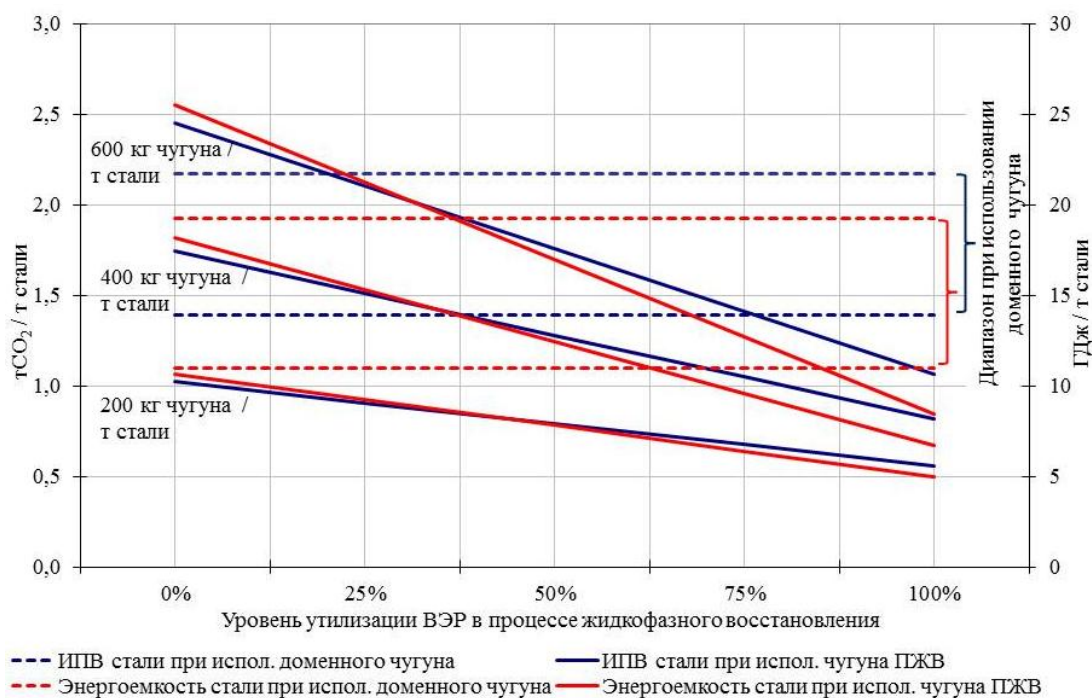


Рисунок 5 – Зависимость выбросов парниковых газов и энергоемкости стали, выплавленной с использованием чугуна ПЖВ, от состава шихты электропечи и уровня утилизации ВЭР.

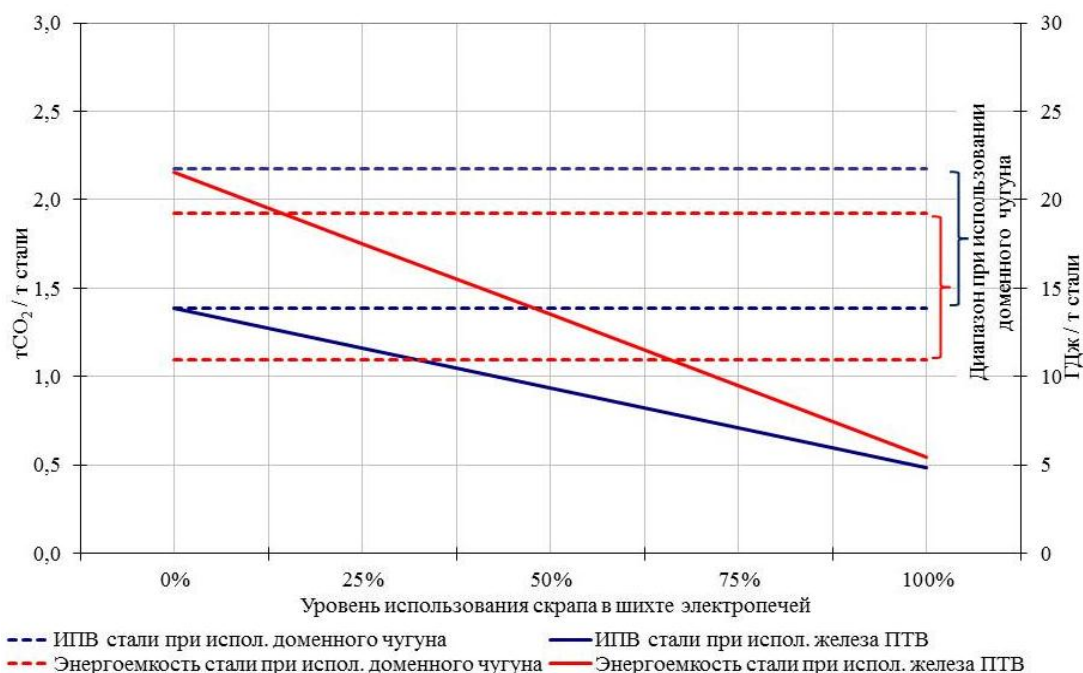


Рисунок 6 – Зависимость выбросов парниковых газов и энергоемкости стали, выплавленной с использованием железа прямого восстановления, от состава шихты электропечи.

В диссертационной работе выполнен анализ эффективности реконструкции металлургического производства с выводом из эксплуатации мартеновских печей на примере ОАО «Ашинский металлургический завод». При производстве стали в мартеновских печах скрап-процессом с разливкой в изложницы энергоемкость производства проката составляла 9,754 ГДж/т, ИПВ – 0,871 т CO₂/т. После строительства дуговой сталеплавильной печи с

загрузочным конвейером Consteel и внедрения машины непрерывного литья заготовки энергоёмкость проката составила 9,286 ГДж/т или на 4,8% ниже энергоёмкости мартеновского производства, ИПВ составил 0,713 т CO₂/т, т.е. сократился на 18,1%.

Выполнено исследование зависимости величины выбросов парниковых газов от технологии выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах (таблица 4) и эффективности выработки электроэнергии, поставляемой из региональных энергосистем России. Результаты расчетов приведены на рисунке 7.

Таблица 4 – Расход энергоносителей и материалов для различных вариантов ДСП.⁴

№	Расход	Ед. изм.	Вариант		
			1	2	3
1	Электроэнергия	МВт·ч/т	0,630	0,420	0,320
2	Природный газ	тыс. м ³ /т	-	0,008	0,010
3	Кислород	тыс. м ³ /т	-	0,030	0,045
4	Коксик	т/т	-	0,002	0,014
5	Известь	т/т	0,052	0,052	0,052
6	Электроды	т/т	0,002	0,002	0,002

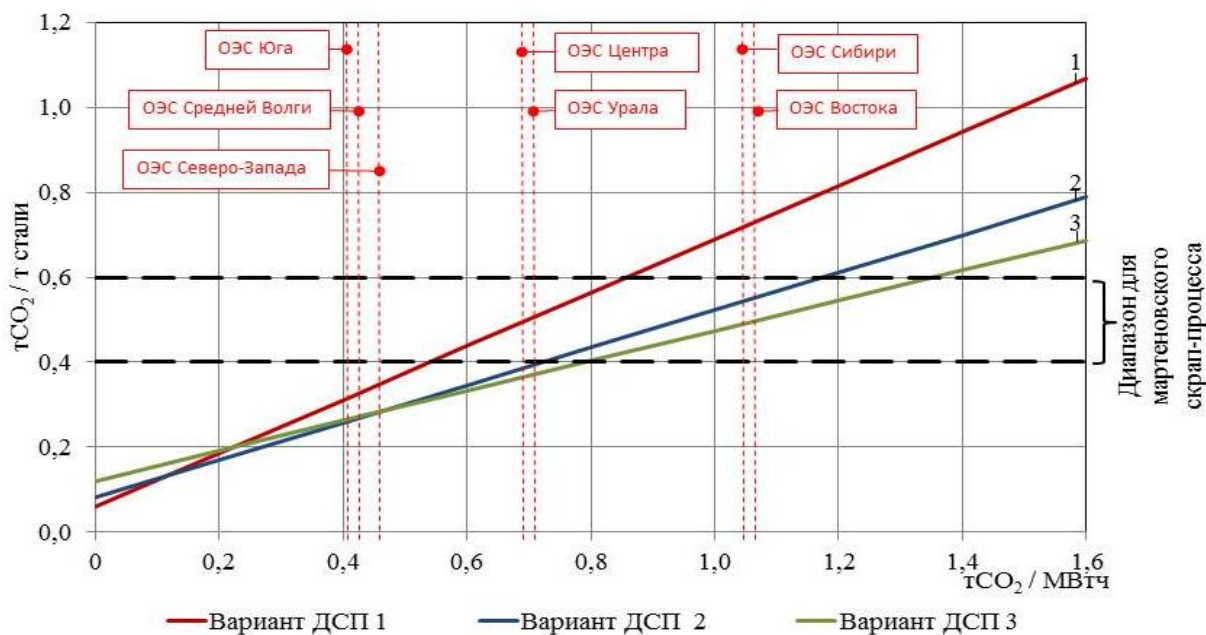


Рисунок 7 – Зависимость выбросов CO₂ при производстве электростали от эффективности выработки электроэнергии.

Основными факторами, определяющими величину выбросов парниковых газов в объединенных энергетических системах (ОЭС) России, являются: структура выработки электроэнергии, эффективность выработки электроэнергии, вид топлива, используемый на тепловых электростанциях, потери электроэнергии при распределении.

⁴ Расход электроэнергии, природного газа, кислорода, коксика принят по данным В.П. Лузгина (2008 г.). Расход извести и электродов принят для всех вариантов ДСП одинаковым на основе среднеотраслевых данных по России.

Сформулированы следующие выводы об эффективности размещения электрометаллургических предприятий на территории России.

1. В случае выработки электроэнергии без использования ископаемого топлива (например на атомных, ветровых или гидроэлектростанциях), эффективность производства электростали по выбросам (0,06-0,12 т CO₂/т стали) в 3-10 раз выше, чем для мартеновского производства (0,4-0,6 т CO₂/т стали). При этом наименьшие выбросы характерны для ДСП без применения альтернативных видов топлива.

2. Наиболее эффективным по показателям выбросов парниковых газов является размещение электросталеплавильных заводов в регионах ОЭС Юга, Средней Волги, Северо-Запада (Ростовской, Волгоградской, Самарской, Нижегородской, Ленинградской, Архангельской областях и др.). Уровень выбросов в данных регионах практически не зависит от технологии выплавки стали и составляет около 0,25-0,35 т CO₂/т стали.

3. В регионах ОЭС Урала и Центра (Вологодской, Липецкой, Свердловской, Челябинской областях и др.) эффективным является размещение электросталеплавильных заводов, работающих по технологии с минимальным расходом электроэнергии за счет предварительного подогрева шихты (например, Consteel) и систем интенсификации плавки (например, Danarc). Выбросы парниковых газов при использовании традиционных ДСП в данных регионах будут примерно на 20% выше (0,49-0,52 т CO₂/т стали), что сопоставимо с мартеновским производством.

4. Эффективность размещения электросталеплавильных мощностей в регионах ОЭС Сибири и Востока (Кемеровская, Новосибирская области; Красноярский, Приморский края и др.) является сопоставимой с мартеновским производством даже при использовании ДСП с минимальным расходом электроэнергии (0,49-0,55 т CO₂/т стали), а применение традиционных ДСП (0,70-0,72 т CO₂/т стали) является нецелесообразным при существующей структуре и эффективности электроэнергетики.

Глава 4 содержит результаты анализа выбросов парниковых газов по предприятиям черной металлургии России в период 2006-2010 гг. и сценарные прогнозы выбросов до 2020 г.

Анализ выбросов выполнен для крупнейших металлургических предприятий России (рисунок 8) и в среднем по отрасли. Исходные данные для расчетов приняты согласно сведениям «Черметинформация» о технико-экономических показателях работы печей и агрегатов предприятий черной металлургии России в 2006-2010 гг. Для большинства металлургических предприятий полного цикла показатели выбросов превышают среднемировой уровень (1,9 т CO₂/т проката) и составляют по состоянию на 2010 г. от 1,912 т CO₂/т проката (Северсталь) до 2,421 т CO₂/т проката (НТМК).

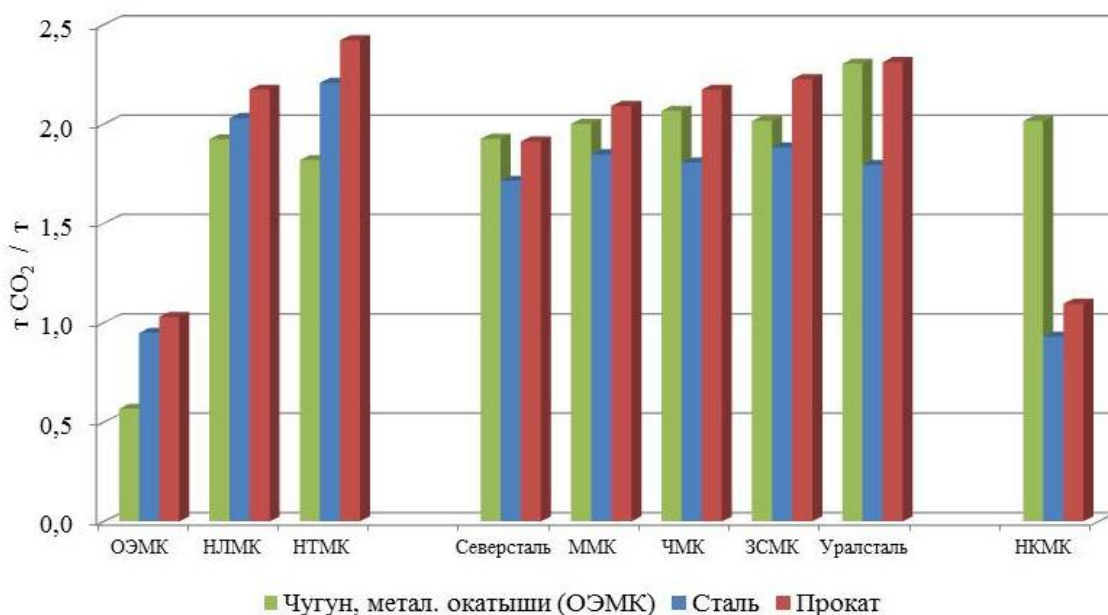


Рисунок 8 – Интегральные выбросы на единицу произведенной металлопродукции на предприятиях черной металлургии России в 2010 г.

В 2006-2010 гг. изменение выбросов на металлургических предприятиях России определялось преимущественно долей чугуна и стального лома в составе металлошихты сталеплавильных агрегатов – коэффициент корреляции более 0,7. Основной вклад в суммарные выбросы парниковых газов вносит производство чугуна – более 56% выбросов (рисунок 9).

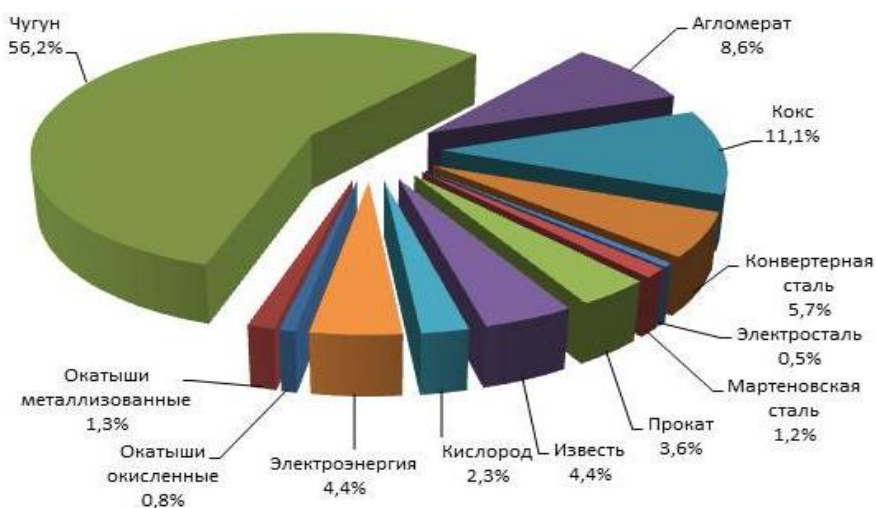


Рисунок 9 – Среднеотраслевая структура выбросов парниковых газов для производства готового проката в России в 2010 г. по основным видам сырья, продукции и энергоресурсов.

Наибольшие удельные выбросы при выплавке стали происходят при мартеновском способе производства – в среднем 0,302 т CO₂/т (по состоянию на 2010 г.), при конвертерном – 0,143 т CO₂/т, при электросталеплавильном – 0,033 т CO₂/т. Наибольшие интегральные выбросы наблюдается для конвертерной стали – 1,990 т CO₂/т, для мартеновской – 1,265 т CO₂/т, для электростали – 0,767 т CO₂/т.

Анализ структуры выбросов парниковых газов в черной металлургии России позволил составить прогноз выбросов на период до 2020 г. с целью оценки эффективности различных технологических сценариев развития. Сформулировано пять сценариев.

1. Инерционный сценарий развития. Характеризуется сохранением текущей структуры и основных показателей производства: структура выплавки стали – 67% конвертерная сталь, 26% электросталь, 7% мартеновская сталь; удельный расход кокса 440 кг/т чугуна, удельный расход железорудного сырья 1,62 т/т чугуна; использование железа прямого восстановления в электросталеплавильном процессе на уровне 14% от железосодержащей части шихты; сохранение структуры разливки стали и расходных коэффициентов на производство проката.

2. Совершенствование существующей схемы производства. Предусматривает совершенствование аглодоменного производства, технологий выплавки и разливки стали: снижение расхода кокса до 300 кг/т чугуна при суммарном расходе восстановителей 414 кг С/т чугуна; увеличение доли электростали до 39%, вывод мартеновского производства; снижение расхода стали на производство проката до 1,08 т/т за счет расширения непрерывной разливки.

3. Повышение эффективности использования ВЭР и вторичного сырья. Предусматривает максимальный уровень утилизации ВЭР и использования лома: увеличение доли лома до 330 кг на 1 т конвертерной стали и до 850 кг на 1 т электростали; увеличение использования доменного шлака на 20%; утилизация конвертерного газа в полном объеме.

4. Развитие технологий внедоменного получения железа. Характеризуется увеличением доли производства электростали до 39%, потребность электросталеплавильного производства в первородном железе удовлетворяется за счет железа прямого твердофазного восстановления.

5. Прогрессивный сценарий развития. Объединяет сценарии 2 - 4 и характеризуется наилучшими технико-экономическими показателями.

Прогноз выбросов выполнялся на основе определения ИПВ при производстве готового проката в России для различных сценариев с учетом их характеристики по формуле:

$$E_{CO_2,k} = P_{steel,k} \times SE_{CO_2,steel,k}, \quad (2)$$

где $E_{CO_2,k}$ - выбросы CO_2 в черной металлургии России в году k , т CO_2 ; $P_{steel,k}$ - производство готового проката в году k , т; $SE_{CO_2,steel,k}$ - интегральный показатель выбросов (ИПВ) производства готового проката в черной металлургии России в году k , т CO_2 /т.

ИПВ готового проката ($SE_{CO_2,steel,k}$) рассчитывался по формуле (1) с учетом расхода сырья и ТЭР при производстве проката, стали, чугун, железа прямого восстановления, агломерата и окатышей, а также с учетом полезной утилизации конвертерного газа и доменного шлака. Производство готового проката ($P_{steel,k}$) принято для всех сценариев в соответствии с энерго-сырьевым сценарием развития отрасли, предусмотренным государственной стратегией. Результаты прогнозирования представлены в таблице 5 и на рисунке 10.

Таблица 5 – Значение ИПВ производства готового проката для различных сценариев развития черной металлургии России, т CO₂/т проката.

№	Сценарий	Значение ИПВ (SE _{CO₂,steel,2010})	Значение ИПВ (SE _{CO₂,steel,2020})	Изменение
1	Инерционный сценарий развития	1,857	1,857	0
2	Совершенствование существующей схемы производства	1,857	1,624	– 0,233
3	Повышение эффективности использования ВЭР и вторичного сырья	1,857	1,588	– 0,269
4	Развитие технологий внедоменного получения железа	1,857	1,708	– 0,149
5	Прогрессивный сценарий развития	1,857	1,343	– 0,514

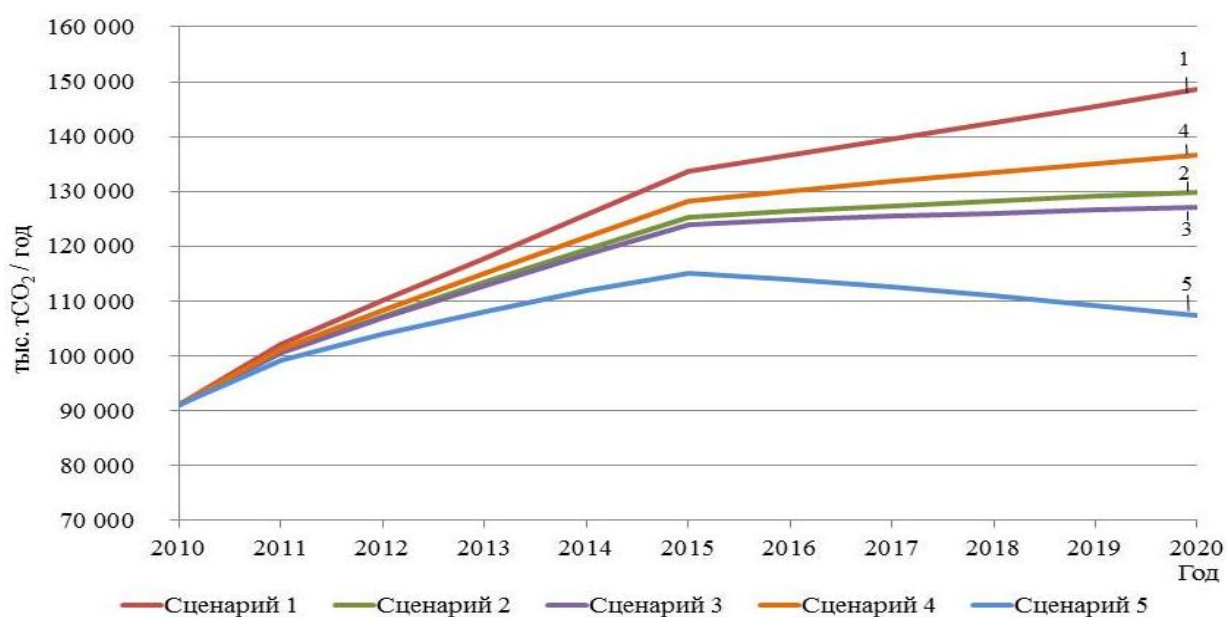


Рисунок 10 – Прогноз выбросов парниковых газов в черной металлургии России на период до 2020 г. при различных технологических сценариях развития.

Совершенствование существующей схемы производства в черной металлургии России до предельно минимальных уровней позволит стабилизировать рост выбросов на уровне 125-130 млн т CO₂ в год. Снижение выбросов парниковых газов с учетом ожидаемого роста производства проката до 80 млн т в год к 2020 г. может быть достигнуто только при увеличении полезного использования ВЭР, вторичного сырья и увеличении внедоменного производства железа. Вклад в сокращение выбросов от использования ВЭР и рециклинга сырья является сопоставимым с совершенствованием технологий производства (более 0,200 т CO₂/т проката).

С целью определения возможного влияния на развитие черной металлургии России международных механизмов ограничения выбросов выполнен прогноз выбросов на период до 2020 г. в соответствии с государственной Стратегией развития металлургической промышленности. Сформулировано два сценария выбросов парниковых газов.

Оптимистический сценарий основывается на инновационном развитии отрасли, характеризуется снижением к 2020 г. ресурсоемкости на 17%, энергоемкости на 20-22%.

Пессимистический сценарий основывается на инерционном и энерго-сырьевом сценариях развития отрасли и сохранением текущего уровня ресурсо- и энергоемкости.

Прогноз выбросов на период до 2020 г. выполнен на основе данных по производству готового проката с учетом изменения ресурсоемкости и энергоемкости продукции по формуле:

$$E_{CO_2,k} = P_{steel,k} \times \left(SE_{f,ko} \times \left(1 - k_{SEf,kn} \times \frac{k-k_0}{k_n-k_0} \right) \right) + \left(SE_{r,ko} \times \left(1 - k_{SEr,kn} \times \frac{k-k_0}{k_n-k_0} \right) \right) \quad (3)$$

где $E_{CO_2,k}$ - выбросы CO_2 в черной металлургии России в году k , т CO_2 ; $P_{steel,k}$ - производство готового проката в году k , т; $SE_{f,ko}$ - удельные выбросы CO_2 , связанные со сжиганием топлива, в году k_0 , т $CO_2/т$; $k_{SEf,kn}$ - коэффициент снижения энергоемкости на конец периода прогнозирования, доля; $SE_{r,ko}$ - удельные выбросы CO_2 от промышленных процессов в году k_0 , т $CO_2/т$; $k_{SEr,kn}$ - коэффициент снижения ресурсоемкости на конец периода прогнозирования, доля; k - год в период прогнозирования (2009-2020 гг.); k_0 - год, предшествующий периоду прогнозирования (2008 г.); k_n - год на конец периода прогнозирования (2020 г.).

Удельные выбросы CO_2 в черной металлургии России на 2008 г. составляли 0,704 т $CO_2/т$ проката для выбросов от сжигания топлива ($SE_{f,ko}$) и 1,408 т $CO_2/т$ проката для выбросов от промышленных процессов ($SE_{r,ko}$). Коэффициенты снижения энергоемкости и ресурсоемкости приняты для оптимистического сценария равными соответственно $k_{SEf,kn} = 0,22$ и $k_{SEr,kn} = 0,17$; для пессимистического сценария равными нулю ($k_{SEf,kn} = 0$, $k_{SEr,kn} = 0$).

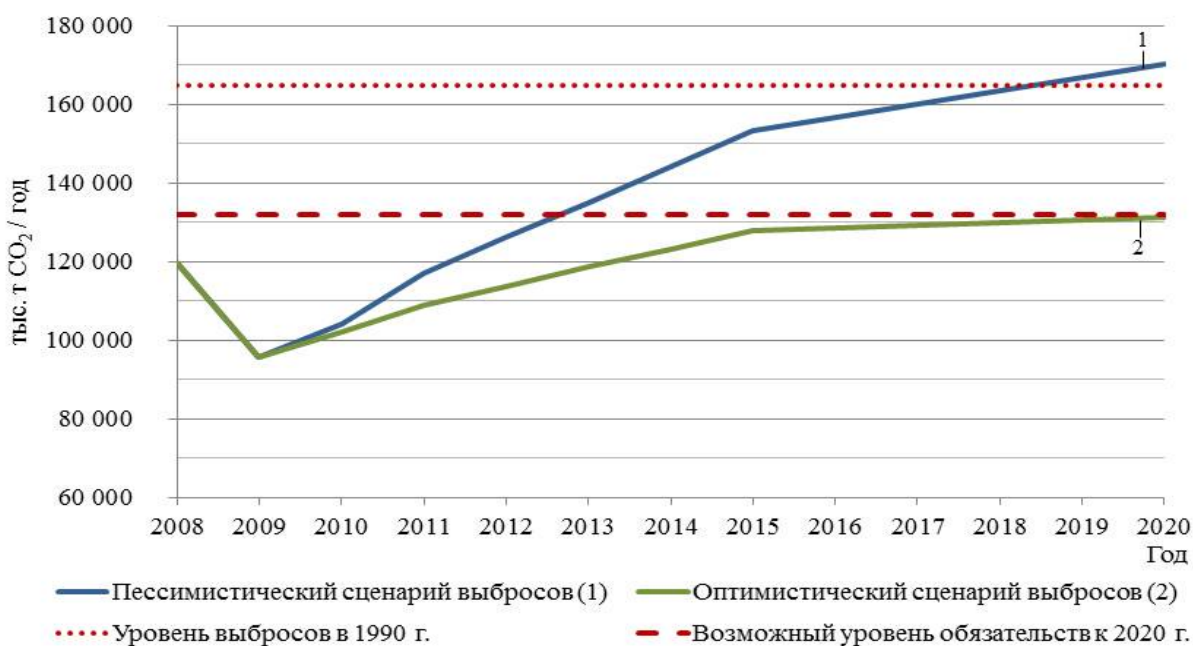


Рисунок 11 – Прогноз выбросов парниковых газов в черной металлургии России на период до 2020 г. в соответствии с государственной Стратегией развития отрасли.

Результаты прогнозирования выбросов парниковых газов в соответствии с отраслевой стратегией развития (рисунок 11) показывают, что выбросы в черной металлургии России не достигнут до конца действия Киотского протокола (2012 г.) уровня 1990 г. при любом сценарии. Однако, при пессимистическом сценарии годовые выбросы могут превысить к 2020 г. уровень выбросов базового года (1990 г.) на 4 млн т CO₂ (2,4%) и планируемый средний уровень обязательств на 37 млн т CO₂ (28,0%). При оптимистическом сценарии годовые выбросы приблизятся к планируемому среднему уровню обязательств к 2020 г. – около 130 млн т CO₂-экв. (или 80% от уровня 1990 г.).

Основные выводы

1. Выявлены закономерности изменения выбросов парниковых газов в черной металлургии России в период 1990-2010 гг. Черная металлургия остается одним из крупнейших источников выбросов парниковых газов в России (114,1 млн т CO₂-экв./год или более 5,2% от национальных выбросов парниковых газов и 7,1% от выбросов CO₂ по состоянию на 2010 г.), что определяется высокой энерго- и ресурсоемкостью отрасли. Выбросы на тонну произведенной стали в России в 2010 г. (1,698 т CO₂/т) были ниже среднемирового уровня (1,8 т CO₂/т) на 5,6%, однако на большинстве интегрированных предприятиях превышали его.

2. Усовершенствована система производственного мониторинга выбросов парниковых газов на предприятиях черной металлургии России:

- выполнена классификация потенциальных источников выбросов предприятий черной металлургии на три категории (выбросы от промышленных процессов, выбросы от сжигания топлива, косвенные выбросы) и обобщены методы расчетного мониторинга для них;

- рассчитаны коэффициенты выбросов и содержание углерода для основных видов топлива (природный газ, коксовый газ, доменный газ, кокс, уголь), используемых на металлургических предприятиях России с учетом их физико-химических характеристик;

- разработаны рекомендации по организации мониторинга выбросов парниковых газов на предприятиях черной металлургии России, включающие процедуры идентификации источников, выбора методов определения выбросов, сбора данных и выполнения расчетов, подготовки отчетности, обеспечения и контроля качества;

- разработан программный комплекс «Информационная система инвентаризации и мониторинга парниковых газов» на базе СУБД SQL Server для автоматизации процессов мониторинга и оптимизации процессов управления.

3. На основе термодинамических расчетов показана возможность вторичного образования CH₄ в колошниковом газе доменных печей в результате взаимодействия водорода (H₂) с углеродом кокса, CO, CO₂, H₂O доменного газа в верхней части шахты доменной печи при температуре ниже 1000°C. Концентрация CH₄ может составлять от 0,2 до 1,3 об.% в

зависимости от используемых видов топлива, обогащения дутья кислородом, температуры выхода колошникового газа и избыточного давления. Выбросы CH_4 в атмосферу в результате потерь доменного газа и его неполного окисления при горении могут составить от 0,008 до 0,558 кг/т чугуна. Средний уровень выбросов при производстве чугуна в России в 2010 г. составил по результатам расчетов около 5,5 тыс. т CH_4 или 115 тыс. т CO_2 -эквивалента.

4. Введено понятие *интегральный показатель выбросов (ИПВ) парниковых газов*, как показателя совокупных выбросов, связанных с производством данного вида продукции на всех стадиях технологической цепочки и за пределами металлургического предприятия. Предложена методика расчета ИПВ, основанная на сквозной оценке расходов сырья, энергоресурсов, выявлении косвенных положительных и отрицательных эффектов выбросов.

5. Выполнена количественная оценка возможности повышения энергоэффективности и сокращения выбросов парниковых газов на металлургических предприятиях для двух основных направлений деятельности: рациональное использование топливно-энергетических ресурсов и сырья; совершенствование технологической структуры производства.

6. Построены диаграммы, позволяющие определять технологические условия выплавки стали с использованием железа внедоменных процессов и минимальную долю утилизации ВЭР, при которых обеспечивается снижение выбросов и энергопотребления для конкретного предприятия или отрасли в целом.

7. Установлено, что экологическая эффективность электрометаллургии в России (по показателям выбросов парниковых газов) зависит от применяемых технологий выплавки стали и территориального размещения металлургического производства.

8. На основе составленных прогнозов показано, что совершенствование существующей схемы металлургического производства, предусмотренное Стратегией развития отрасли, позволит стабилизировать к 2020 г. рост выбросов парниковых газов на уровне 125-130 млн т CO_2 /год. Снижение выбросов в отрасли может быть достигнуто только при дополнительном увеличении полезного использования вторичных энергетических ресурсов (в первую очередь, конвертерного газа) и применении технологий внедоменного производства железа при развитии электросталеплавильного производства.

Основные публикации по теме диссертационной работы

1. Казаков Р.А., Черноусов П.И., Зволинский В.П., Коротченко Н.А. Возможность повышения энергоэффективности при использовании технологий внедоменного получения железа // *Металлург.* – 2013. – №2. – С. 30-33.

2. Казаков Р.А., Подгородецкий Г.С., Юсфин Ю.С., Зволинский В.П. Исследование потенциальных выбросов метана от доменного производства на основе расчетов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 2012. – №9. – С. 3-8.

3. Казаков Р.А., Зволинский В.П., Черноусов П.И. Совершенствование методологических подходов к комплексной оценке выбросов парниковых газов в черной металлургии // Металлург. – 2011. – №12. – С. 27-31.
4. Казаков Р.А., Зволинский В.П., Федоров Ю.Н., Ледашева Т.Н. Динамика выбросов парниковых газов в черной металлургии России // Экология и промышленность России. – 2011. – №6. – С. 44-48.
5. Казаков Р.А., Зволинский В.П., Подгородецкий Г.С. Комплексная оценка и прогноз выбросов парниковых газов на предприятиях черной металлургии России // Актуальные проблемы экологии и природопользования: Сб. науч. тр. Вып. 15. – М.: РУДН, 2013. – С. 24-29.
6. Казаков Р.А., Черноусов П.И., Зволинский В.П. Прогноз выбросов парниковых газов на период до 2020 г. // Вторичные металлы. – 2012. – №6/31. – С. 60-63.
7. Казаков Р.А., Дарда И.В., Зволинский В.П. Проблема повышения энергоэффективности и сокращения выбросов парниковых газов на предприятиях черной металлургии // Экономика, экология и общество России в 21-м столетии: Сб. науч. тр. 14-й Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 292-302.
8. Казаков Р.А., Дарда И.В., Зволинский В.П. Основы теоретического анализа энергетической и экологической эффективности металлургических предприятий // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4; URL: <http://www.science-education.ru/104-6764>.
9. Казаков Р.А., Зволинский В.П. Расчет коэффициентов выбросов CO₂ от сжигания топлива, используемого на предприятиях черной металлургии России // Актуальные проблемы экологии и природопользования: Сб. науч. тр. Вып. 13. – М.: РУДН, 2011. – Ч. 1. – С. 388-394.
10. Аджиев Г.В., Казаков Р.А. Разработка системы мониторинга выбросов парниковых газов, интегрированной в экономические процессы, на примере черной металлургии // Актуальные проблемы экологии и природопользования: Сб. науч. тр. Вып. 13. – М.: РУДН, 2011. – Ч. 1. – С. 353-358.
11. Казаков Р.А., Зволинский В.П. Методы сокращения выбросов парниковых газов и повышения энергоэффективности на предприятиях черной металлургии России // Актуальные проблемы экологии и природопользования: Сб. науч. тр. Вып. 12. – М.: ИПЦ «Луч», 2010. – С. 247-256.
12. Казаков Р.А., Зволинский В.П. Анализ и прогноз выбросов парниковых газов в черной металлургии России в период 1990-2020 гг. // Региональная наука: Одиннадцатая международная научная конференция молодых ученых 2-3 ноября 2010 г. / Сб. науч. тр. – М.: ЛЕНАНД, 2010. – С. 32-36.