



**Овчинников К. Н.**

*к.т.н., доцент, руководитель магистерской программы «Геологическое обеспечение и мониторинг технологий утилизации, хранения и ресурсосбережения углеродных газов» УГНТУ*

*kirill.ovchinnikov@energycc.org*

# КАРБОНОВЫЙ СЛЕД МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ОБЗОР ПЕРСПЕКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПО ЕЁ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ В КИТАЕ, США И ГЕРМАНИИ

*Данная статья предлагает анализ технологий снижения выбросов парниковых газов ключевых основных стран-производителей металлургической промышленности – США, Китая и Германии. Особое внимание уделено анализу снижения выбросов парниковых газов в черной металлургии переходом с доменно-конвертерного на электросталеплавильный процесс с использованием железа прямого восстановления.*

**Ключевые слова:** декарбонизация, карбоновый след, снижение выбросов парниковых газов, геологическое захоронение CO<sub>2</sub>, низкоуглеродная энергетика.

**В** последние годы все больше внимания уделяется проблеме, связанной с сокращением выбросов парниковых газов, в т.ч. при производстве чугуна и стали. В октябре 2021 г. была опубликована «Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.». В ней наиболее перспективными технологиями в металлургии названы увеличение доли производства железа прямого восстановления (ПЖ), замена природного газа на водород, применение технологий улавливания, утилизации и хранения углерода.

Главным направлением снижения выбросов парниковых газов в чёрной металлургии в России обозначен переход с доменно-конвертерного на электросталеплавильный процесс с ис-

пользованием железа прямого восстановления. Данная статья предлагает анализ технологий снижения выбросов парниковых газов ключевых основных стран-производителей металлургической промышленности – США, Китая и Германии.

## **Актуальность проблемы выбросов металлургического сектора**

В масштабе планеты вклад металлургического сектора в общее количество выбросов парниковых газов составляет порядка 9%. Несмотря на то, что отрасль не является основным источником выбросов, многие сталелитейные компании Европы включились в процесс разработки и внедрения новых технологий, позволяющих существенно сократить выделение углерода

на всех циклах производства без существенного снижения производительности оборудования.

Нужно отметить, что добиться существенного снижения потребления углерода в рамках известных технических решений на сегодняшний день уже невозможно. В итоге, практически все новые проекты построены на двух принципах – замещение углеродного сырья на водород и установка систем улавливания CO<sub>2</sub> из атмосферы. Перспективные технологии снижения выбросов представлены в **таблице 1**.

Ожидается, что применение ряда перспективных технологий обеспечит сокращение выбросов CO<sub>2</sub> на 30% к 2030 году за счёт улавливания и связывания углекислого газа.

В любом случае разработка новых безуглеродных технологий производства стали влечёт увеличение затрат металлургических компаний на любом континенте. Компания Eurofer опубликовала отчёт по оценке затрат на производство стали с учётом новых технологий к 2050 году, и их увеличение составит от 35 до 100% относительно себестоимости производства стали по «классической» технологии. По оценкам проекта HYBRIT рост удельных затрат составит от 20 до 30% в текущих ценовых соотношениях стоимости сырья и энергоресурсов.

Складывается ситуация, когда себестоимость производства стали в Европе, с учётом реализации новых технологий, будет существенно превышать стоимость импортного проката из других стран. В основном потому, что эти страны ещё не применяют новые технологии по снижению выбросов углерода.

**Таблица 1.**

*Перспективные технологии снижения выбросов CO<sub>2</sub>.*

	Прямое предотвращение выбросов углерода (CDA)	Производство зеленого водорода	Улавливание и использование углерода (CCU)	Улавливание и хранение углерода (CCS)	Срок реализации
SSAB	HYBRIT		FReSMe		2045
Voestalpine	SuSteel/DRI	H2Future			Замена доменных печей с 2035
Salzgitter	SALCOS	GrinHy/Salzitter Clean Hydrogen	SALCOS		-
Tata Steel Ijmuiden	Hisama	Green cluster Amsterdam	FReSMe/Steel2 Chemical	Hisama	2050
TKS	IN4climate	Carbon2Chem			80% к 2050
ArcelorMittal Gent			Steelanol/Sreel 2Chemicals		30% снижение CO <sub>2</sub> в Европе к 2030
ArcelorMittal Fos			Carbon4PUR		
ArcelorMittal Hamburg	Grey hydrogen in DRI				
ArcelorMittal Dunkerque		IGAR			

Всё чаще отмечают два аспекта:

- импорт проката в Европу из стран, не занимающихся снижением нагрузки на окружающую среду, является так называемым «импортом загрязнений»
- подчёркивается необходимость «корректирующего налога» на такой импорт, с целью компенсации затрат сталелитейным компаниям Европы на борьбу с углеродным следом.

По оценкам крупнейшей глобальной сталепроизводительной компании ArcelorMittal затраты на достижение углеродно-нейтрального баланса к 2050 году могут достичь €40 млрд. И для их компенсации требуется введение «корректирующего пограничного углеродного налога». Создаются условия для введения дополнительного – «зелёного» налога как для выравнивания условий доступа на европейский рынок для стран, не участвующих в глобальной задаче сокращения «углеродного следа», так и для компенсации затрат европейских металлургических компаний на разработку проектов безуглеродной металлургии.

Подходы по определению плательщиков такого «эконалога» могут быть разными. К примеру, по схеме удельных выбросов парниковых газов на душу населения и на ВВП. Или с учётом доли присутствия на рынке стального импорта в Европу.

Вне зависимости от подхода наибольшая нагрузка ляжет на металлургические компании России, Китая и Турции.

Принцип применения новой «экологической пошлины» может быть применён как в отношении государств, так и в отношении металлургических компаний.

### Тренды индустрии производства стали по ключевым странам-производителям (Китай, США и Германия)

Китай – развивающаяся страна, которая в настоящее время находится в процессе индустриализации. Китайская металлургическая промышленность быстро росла вместе с национальной экономикой. В течение последних 25 лет подряд Китай был крупнейшим производителем сырой стали в мире. Производство стали в 2020 году составило 1053 млн тонн, что составило более половины от мирового производства. Сталелитейная промышленность Китая вносит значительный вклад в глобальные выбросы CO<sub>2</sub>.

Производство нерафинированной стали в Германии достигло пика в 48 млн тонн в 2007 году, после чего упало до 35,7 млн тонн в 2020 году. Увеличение было результатом увеличения производства стали в электродуговых сталеплавильных печах, в то время как производство с использованием процесса доменно-конвертерной печи оставалось почти постоянным. Металлургическая промышленность Германии постоянно сокращала потребление кокса в доменной печи, достигнув впечатляющего снижения на 50% за последние десятилетия за счёт применения таких мер повышения эффективности, как турбина восстановления верхнего давления, вдувание пылевидного угля, использование кислорода.

В США производство стали достигло пика в 1973 году и составило 137 млн тонн с последующим плавным падением. К 2020 г. уровень производства стали в США упал до 72 млн тонн. Интенсивность выбросов CO<sub>2</sub> и энергоэффективность производства стали в США постоянно улучшались из-за реструктуризации отрасли в 1980-х годах, увеличения производства стали в электродуговых сталеплавильных печах, внедрения непрерывной разливки, использования

прямого горячего проката и совершенствования процесса производства сырья. Согласно статистике worldsteel.org, в 2020 году на долю одного только Китая приходилось около 56% мирового производства стали. США и Германия в том же году занимали 5-е и 8-е места по производству стали в мире. Таким образом, страны, представленные в этой статье, относятся к крупнейшим странам-производителям стали в мире (Таблица 2).

### Статистика выбросов CO<sub>2</sub> металлургической промышленностью по ключевым производителям стали

На интенсивность выбросов CO<sub>2</sub> при производстве стали влияют отраслевая структура страны, технология, выбор топлива, коэффициент выбросов, загрузка мощностей сталеплавильных заводов и материалы (например, наличие стального лома).

В данной статье исследуется интенсивность выбросов CO<sub>2</sub> в качестве единицы сравнения чёрной металлургии Китая, Германии и США. Критерием является индекс выбросов CO<sub>2</sub> на тонну произведённой сырой стали.

**Интенсивность CO<sub>2</sub>=(Выбросы CO<sub>2</sub> от черной металлургии)/(Производство сырой стали+Торговля необработанной сталью)**

Для расчёта энергоёмкости было использовано производство сырой стали в качестве знаменателя. Однако отметим, что процессы литья, прокатки и чистовой обработки, которые происходят после производства сырой стали, также находятся в рамках анализа.

На рисунке 1 показана интенсивность выбросов CO<sub>2</sub> в чёрной металлургии Китая, Германии и США в 2020 году. Производство сырой стали в США в 2020 году составило 80,5 млн тонн.

Таблица 2. Крупнейшие производители стали.

Рейтинг стран по объемам производства стали				
Место	Страна	2019 млн. т	2020 млн. т	Динамика, %
1	Китай	1001.3	1053	5.2
2	Индия	111.4	99.6	-10.6
3	Япония	99.3	83.2	-16.2
4	Россия	71.6	73.4	2.5
5	США	87.8	72.7	-17.2
6	Южная Корея	71.4	67.1	-6.0
7	Турция	33.7	35.8	6.2
8	Германия	39.6	35.7	-9.8
9	Бразилия	32.6	31	-4.9
10	Иран	25.6	29	13.3

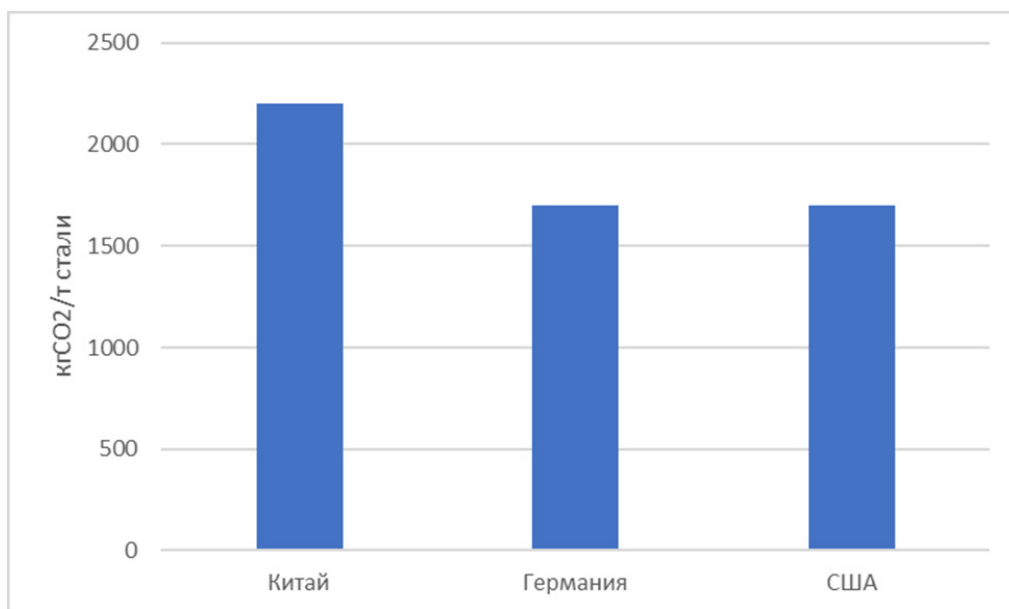
Кроме того, было 3,99 млн тонн импортированных слитков, блюмсов, заготовок и плит. Таким образом, общее производство сырой стали в США, использованное для расчетов энергоемкости в 2010 году, составило 72 млн тонн. Согласно базовому анализу, выбросы CO<sub>2</sub>, связанные с общим потреблением электроэнергии и топлива в черной металлургии США в 2020 году, исходя из границ отрасли, составляли 39 365 и 107 353 тыс. тонн CO<sub>2</sub>, соответственно. Если эти выбросы разделить на производство сырой стали, то удельный вес CO<sub>2</sub>, связанный с использованием электроэнергии и топлива, можно рассчитать отдельно. Сумма этих двух значений интенсивности CO<sub>2</sub> дается как общая интенсивность CO<sub>2</sub> в сталелитейной промышленности США. На **рисунке 2** показаны результаты того же расчёта интенсивности CO<sub>2</sub> для сталелитейной промышленности в трёх других исследованных странах. У Китая самая высокая общая интенсивность CO<sub>2</sub> в сталелитейной промышленности.

Общая интенсивность выбросов CO<sub>2</sub> в немецкой сталелитейной промышленности на 2% ниже, чем в США, что примечательно, учитывая, что в 2020 году доля Германии в производстве стали с помощью доменных печей (ДП), была ниже, чем в США. Доли оцениваются в 30% и 61% от общего объёма производства соответственно. Производство стали в электродуговых печах (ЭДП) имеет гораздо более низкую интенсивность выбросов CO<sub>2</sub>, чем производство стали в ДП. Далее рассмотрим другие факторы, влияющие на интенсивность CO<sub>2</sub> в сталелитейной промышленности трёх стран. Помимо расчёта интенсивности CO<sub>2</sub> для всей сталелитейной отрасли, мы отдельно

рассчитали удельную мощность CO<sub>2</sub>, связанную с производственным маршрутом в ЭДП и ДП в этих странах. На **рисунке 2** показана интенсивность выбросов CO<sub>2</sub>, рассчитанная для производства ЭДП и ДП/ОКП в Китае, Германии и США.

Одна из основных причин того, что интенсивность CO<sub>2</sub> при производстве стали из ЭДП в Китае значительно выше, чем в Германии и США, – в связи с тем, что более 45% сырья для ЭДП в Китае в 2020 году составлял чугун. Производство чугуна расходует большее количество топлива и выделяет больше углекислого газа. В США только около 10% сырья для ЭДП составляет чугун, а в Германии доля чугуна минимальна. Также на **рисунке 2** видно, что интенсивность выбросов на ДП/ОКП примерно одинакова в Китае и Германии, но значительно выше в США. Более высокая интенсивность выбросов CO<sub>2</sub> у ДП/ОКП в США может быть вызвана различными причинами, такими как более старые установки доменного и кислородного конвертеров и более низкая степень внедрения технологий повышения энергоэффективности, таких как сухое тушение кокса (CDQ) и турбина регенерации верхнего давления (TRT) в доменных печах. Тем не менее, подробное исследование того, почему при производстве стали доменных печей / конвертеров в США значительно выше интенсивность выбросов CO<sub>2</sub>, может стать темой будущих исследований.

Приведённые здесь интенсивности относятся к полным технологическим циклам ЭДП, ДП/ОКП, которые включают разливку, прокатку и чистовую обработку продукции. То есть эти значения интенсивности для производства ЭДП, ДП/ОКП включают потребление энергии



**Рис. 1.** Базовый вариант – интенсивность выбросов CO<sub>2</sub> черной металлургии Китая, Германии и США в 2020 году.

чистого импортируемого топлива, вспомогательных и промежуточных материалов. Кроме того, интенсивности выбросов CO<sub>2</sub>, показанные на **рисунках 1 и 2** могут отличаться от значений интенсивности выбросов CO<sub>2</sub>, рассчитанных в других исследованиях для сталелитейной промышленности представленных странах. Основная причина такой разницы может заключаться в различиях в определении того, что входит в границы отрасли и, следовательно, что не включается в расчёт значений интенсивности. Например, если другое исследование не включает затраченную энергию импортированного топлива и вспомогательных / промежуточных продуктов, то интенсивность CO<sub>2</sub>, рассчитанная в другом исследовании, вероятно, будет ниже, чем значение, рассчитанное в этой статье.

### Факторы эффективности, влияющие на выбросы CO<sub>2</sub>

В дополнение к базовому случаю, представленному выше, мы проанализировали влияние нескольких различных факторов на значение интенсивности CO<sub>2</sub> в производстве чугуна и стали для каждой страны. Цель этого факторного анализа состояла в том, чтобы определить, какие переменные являются наиболее важными для объяснения различий в интенсивности CO<sub>2</sub> между Китаем, Германией и США. Первый факторный анализ изучает влияние изменения соотношения ЭДП на интенсивность CO<sub>2</sub>. Этот анализ состоит из двух подразделов:

1.a Использует коэффициенты преобразования топлива для конкретной страны, коэффициенты выбросов CO<sub>2</sub> из электросети страны, ко-

эффициенты преобразования мировой стали для вспомогательных / промежуточных материалов и коэффициент ЭДП в Китае в 2020 году для расчёта интенсивности CO<sub>2</sub> для Германии и США.

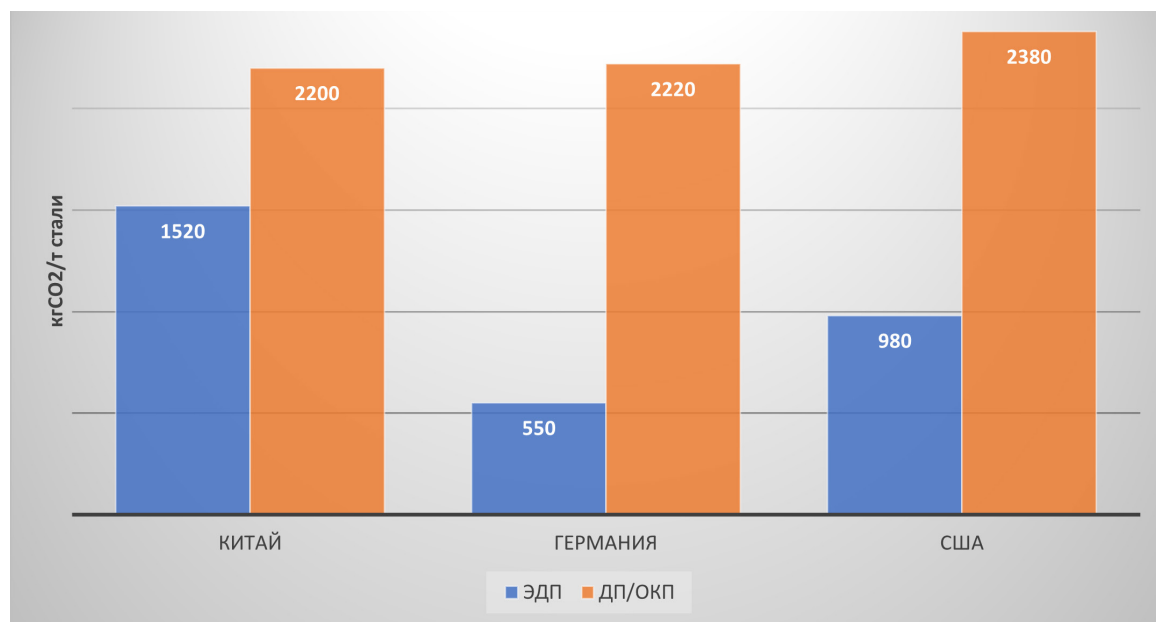
1.б Использует коэффициенты преобразования топлива для конкретной страны, коэффициенты выбросов CO<sub>2</sub> из электросети страны, коэффициенты преобразования мировой стали для вспомогательных / промежуточных материалов и коэффициент ЭДП в США в 2020 году для расчёта интенсивности CO<sub>2</sub> для Китая и Германии.

Второй факторный анализ исследует влияние на интенсивность CO<sub>2</sub> изменения коэффициентов выбросов CO<sub>2</sub> из электросети. Он состоит из двух следующих подразделов, основывающихся на данные 2020 года:

2.a Использует коэффициенты преобразования топлива для конкретных стран, коэффициенты преобразования мировой стали для вспомогательных/промежуточных материалов и коэффициент выбросов CO<sub>2</sub> от электросетей Китая для расчёта интенсивности CO<sub>2</sub> для Германии и США

2.б Использует коэффициенты преобразования топлива для конкретной страны, коэффициенты преобразования мировой стали для вспомогательных / промежуточных материалов и коэффициент выбросов CO<sub>2</sub> от электросетей США для расчёта интенсивности CO<sub>2</sub> для Китая и Германии.

На **рисунке 3** показаны результаты факторного анализа трех исследованных стран. В этом сравнении представлены результаты базового случая и двухфакторного анализа с рассчитанной интенсивностью CO<sub>2</sub> для Китая, Германии и США.



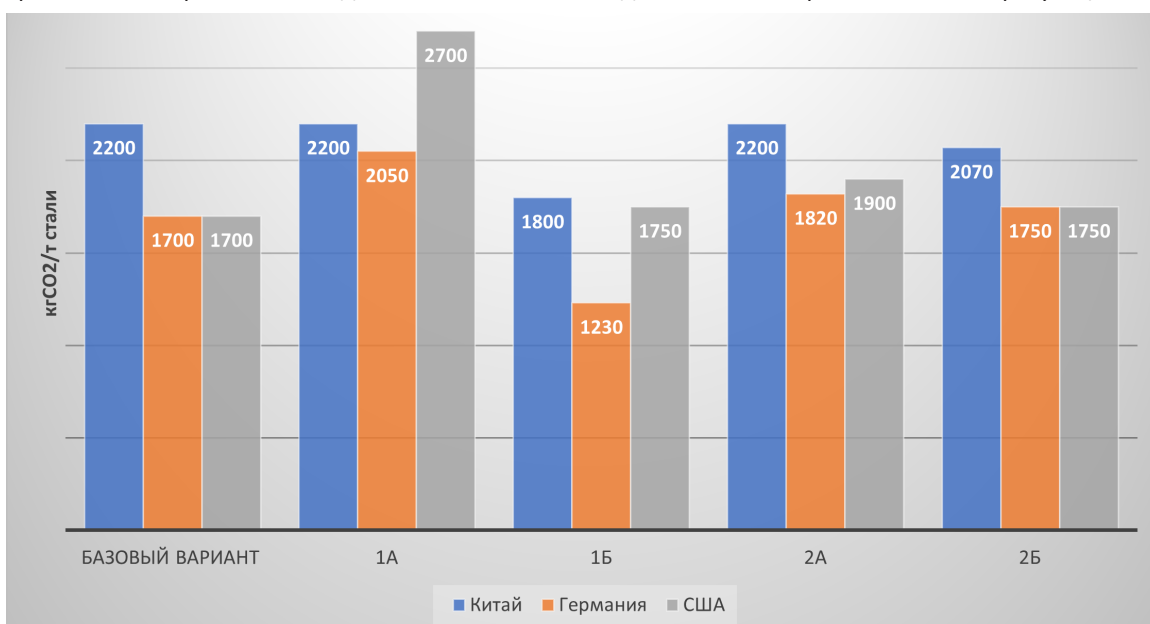
**Рис. 2.** Уровни выбросов CO<sub>2</sub> для ЭДП и ДП/ОКП в Китае, Германии и США в 2020 году.

Факторный анализ 1а показывает, что, когда коэффициент ЭДП Китая 2020 года (который является самым низким среди исследованных стран) используется для расчётов интенсивности CO<sub>2</sub> для двух других стран, общая интенсивность CO<sub>2</sub> в сталелитейной промышленности Германии и США увеличивается на 19% и 56%, соответственно, по сравнению с анализом базового случая. В этом отношении коэффициент ЭДП в Германии в 2020 году (31,2%) ближе к соотношению ЭДП в Китае. Результаты факторного анализа 1а и 1б демонстрируют сильное влияние коэффициента ЭДП на интенсивность выбросов CO<sub>2</sub> при производстве стали в исследуемых странах. Поэтому во всех сравнительных исследованиях на отраслевом уровне этот фактор всегда следует принимать во внимание и оценивать его влияние. Факторный анализ 2а показывает, что, когда используется коэффициент выбросов CO<sub>2</sub> из электросети Китая (который является самым высоким среди исследованных стран) для расчетов интенсивности CO<sub>2</sub> в двух других странах общая интенсивность CO<sub>2</sub> в сталелитейной промышленности Германии и США увеличивается на 5% и 10% соответственно, по сравнению с анализом базового случая. В анализе базового сценария удельные выбросы CO<sub>2</sub>, связанные с использованием электроэнергии, составили 11% и 27% от общей интенсивности выбросов CO<sub>2</sub> в сталелитейной промышленности Германии и США в 2020 году, соответственно. Это также в основном связано с более высоким процентом производства стали в ЭДП в США по сравнению с Германией. Следовательно, в этом

факторном анализе увеличение интенсивности CO<sub>2</sub> в результате увеличения коэффициента выбросов CO<sub>2</sub> от электрической сети меньше для Германии и больше для США. С другой стороны, факторный анализ 2б показывает, что, когда коэффициент выбросов CO<sub>2</sub> от электросети США используется для расчёта интенсивности CO<sub>2</sub> в других странах, общая интенсивность выбросов CO<sub>2</sub> в сталелитейной промышленности Германии увеличилась на 1%, а в Китае снизилась на 4% по сравнению с их базовыми анализами. Это связано с тем, что коэффициент выбросов CO<sub>2</sub> от электрических сетей в Германии ниже, а в Китае выше, чем в США. Некоторые факторы неопределенности могут повлиять на результаты и их интерпретацию. Сюда входит расчёт вычета энергопотребления для ферросплавов из китайской статистики. Ферросплавы не входят в рамки этого исследования.

#### Анализ методологии расчетов выбросов CO<sub>2</sub> металлургического производства

Углеродный след – это масса парниковых газов, выделяющихся при производстве. В чёрной металлургии образуется два вида парниковых газов: диоксид углерода и метан. Кроме того, в отходящих газах агрегатов содержится значительное количество оксида углерода, процесс выделения которого показан ниже на **рисунке 4**. Метан и оксид углерода являются топливными вторичными энергетическими ресурсами (ВЭР), которые сгорают в других агрегатах, образуя диоксид углерода. Таким образом, принимаем, что единственный парниковый газ, образующийся в



**Рис. 3.** Сравнение интенсивности CO<sub>2</sub> для черной металлургии в Китае, Германии и США: результаты базового и четырехфакторного анализа.

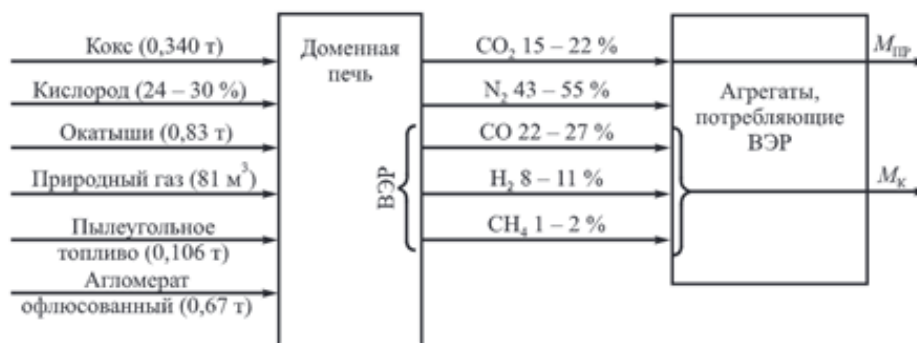


Рис. 4. Образование прямой и косвенной эмиссии CO<sub>2</sub> при работе доменной печи. (Formation of direct and indirect CO<sub>2</sub> emissions at work of BF).

чёрной металлургии – диоксид углерода. Методики определения эмиссии диоксида углерода в металлургии ориентированы на определение этой эмиссии для каждого агрегата. Требуется оценка, сколько и в каких соотношениях сгорают в этих агрегатах различные виды углеродосодержащего топлива. Каждый агрегат, образующий вторичные энергетические ресурсы, характеризуется прямой и косвенной эмиссией диоксида углерода. Прямая эмиссия МПР определяется массой диоксида углерода, выделяющегося в этом агрегате. Эта эмиссия зависит от режима работы агрегата и может колебаться в широких пределах. Косвенная эмиссия диоксида углерода МК соответствует сжиганию оксида углерода и метана, выработанными этим агрегатом.

В соответствии с видением межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) существует три уровня расчёта выбросов CO<sub>2</sub> производства кокса. На практике выбор методики оценки выбросов зависит от специфики страны и региона и зависят от двух факторов. Во-первых, известны ли заводские

$$E_{CO2, \text{энерг}} = \left[ CC * C_{cc} + \sum_a (PM_a * C_a) + BG * C_{BG} - CO * C_{CO} - COG * C_{COG} - \sum_b (COB_b * C_b) \right] * \frac{44}{12}$$

данные о выбросах или о деятельности? Если да, то выбросы рассчитываются с помощью заводских коэффициентов выбросов или данных о деятельности. Если нет, что дальнейший шаг зависит от наличия данных о производстве кокса внутри и вне предприятий. Далее выбросы рассчитываются на основании производства кокса с использованием данных об углеродном содержании материалов или допускается, что весь кокс произведен на локально.

- Первый метод расчета для оценки выбросов CO<sub>2</sub> учитывает выбросы от любого производства кокса. Коэффициенты выбросов по умолчанию умножают на локальное производство кокса.

- Второй метод расчета для оценки выбросов CO<sub>2</sub> учитывает отдельно производство кокса внутри и вне предприятия. В нём исполь-

зуются статистические данные о потреблении и производстве технологических материалов (коксующегося угля и т.д.).

- Третий метод расчета требует наличия конкретных данных о выбросах CO<sub>2</sub> похожего или конкретного производства.

#### Первый метод расчета

$$E_{CO2} = \text{Coke} * EF_{CO2}$$

Где: E<sub>CO<sub>2</sub></sub> = выбросы CO<sub>2</sub> от производства кокса, тонны CO<sub>2</sub>

Coke = количество кокса, выпущенного в стране в тоннах

EF = коэффициент выбросов, тонны CO<sub>2</sub>/тонну продукции кокса

В этом методе допускается о том, что все побочные продукты коксовой печи транспортируются с места производства и весь газ из камерных печей сжигается на месте.

#### Второй метод расчета

Где

Где: E<sub>CO<sub>2</sub>, энерг</sub> = выбросы CO<sub>2</sub> от производства кокса на месте;

тонны CC = количество коксующегося угля, потребляемого при производстве кокса на месте;

тонны PM<sub>a</sub> = количество другого технологического материала a, отличного от материалов, учтенных отдельно в специальных членах, например природного газа и топливного масла, потребленного для производства кокса и агломерата на месте производства кокса, чугуна и стали, тонны BG = количество доменного газа, израсходованного в доменных печах, м<sup>3</sup>;

CO = количество кокса, произведенного на месте производства чугуна и стали;

тонны COG = количество газа из камерных печей, транспортированного с места производ-

ства,  $m^3 CO_{Bb}$  = количество побочного продукта  $b$  коксовой печи, перемещённого с места производства на другое предприятие;

тонны  $S_x$  = углеродное содержание материала загрузки или продукта  $x$ , тонны  $C$ /(единица для материала  $x$ ) [например, тонны  $C$ /тонну].

### Третий метод расчета

$$E_{CO_2, \text{энерг}} = \left[ CC * C_{CC} + \sum_a (PM_a * C_a) - NIC * C_{NIC} - COG * C_{COG} - \sum_b (CO_{Bb} * C_b) \right] * \frac{44}{12}$$

Где

$E_{CO_2, \text{энерг}}$  = выбросы  $CO_2$  от производства кокса на неинтегрированном предприятии;

тонны  $CC$  = количество коксующегося угля, израсходованного на неинтегрированном предприятии по производству кокса;

тонны  $PM_a$  = количество другого технологического материала  $a$ , отличного от коксующегося угля, например природного газа или топливного масла, израсходованного на неинтегрированное производство кокса в стране;

тонны  $NIC$  = количество кокса, выпущенного на неинтегрированных предприятиях по производству кокса, в стране;

тонны  $COG$  = количество газа из камерных печей, произведённого на неинтегрированных предприятиях страны и транспортированного на другие предприятия,  $m^3$  (или другие единицы, например тонны или ГДж);

$CO_{Bb}$  = количество побочного продукта  $b$  коксовой печи, произведённого на сторонних неинтегрированных предприятиях и перемещённого с места производства на другие предприятия;

тонны  $S_x$  = углеродное содержание материала загрузки или продукта  $x$ , тонны  $C$ /(единица для материала  $x$ ) [например, тонны  $C$ /тонну].

Отличие третьего метода в том, что используются данные конкретных производств. Производства могут сильно различаться по технологии и условиям. Если фактические измеренные выбросы  $CO_2$  для интегрированных и неинтегрированных предприятий по производству кокса известны, то эти данные можно суммировать и использовать напрямую для учёта локальных выбросов от производства доменного кокса по третьему методу. Общие национальные выбросы равны сумме выбросов всех предприятий. Если нет данных о заводских выбросах  $CO_2$ , то выбросы  $CO_2$  можно рассчитать на основании заводских данных о деятельности по второму методу. Общие выбросы  $CO_2$  в регионе равны сумме выбросов всех локальных предприятий.

### Неопределенности в методах расчетов выбросов $CO_2$

Принято считать, что коэффициенты выбросов по умолчанию для производства кокса и стали, используемые при расчётах в первом методе, имеют погрешность 25%. Погрешность значений углеродного содержания материалов для второго метода оценивается в 10%. Предполагается, что неопределённость коэффициентов выбросов при расчетах по методу 3

составляет не более 5% при наличии производственных данных об углеродном содержании и массовом расходе. В **таблице 3** представлены диапазоны погрешности для коэффициентов выбросов, углеродного содержания и данных о деятельности. Для первого метода расчётов самой важной информацией о деятельности являются данные о производстве стали по каждому конкретному способу. Можно предполагать, что данные национальных статистик будут иметь неопределённость  $\pm 10\%$ . Для второго метода расчётов погрешность для общего количества восстановителя и технологического материала для производства чугуна и стали принимается в пределах 10%. Для третьего метода расчетов необходимо знать заводские данные о количестве восстановителя и технологических материалов (около 5%). Считается, что данные о фактических выбросах для также имеют неопределённость  $\pm 5\%$ . Погрешности третьего метода расчетов может быть снижена при анализе фактических данных конкретного производства.

### Обзор перспективных решений по выбросам $CO_2$ в металлургической индустрии по ключевым странам производителям

Сталь производится по двум основным технологическим цепочкам:

- Процесс восстановления железорудного сырья в доменной печи (BF) с последующим выжиганием углерода из чугуна в кислородно-конвертерном процессе (BOF),

- Переплавка металлолома в электродуговой печи (EAF), либо с использованием железа прямого восстановления (DRI).

Наибольшая часть выбросов углерода происходит в процессе восстановления железа, где происходит химическая реакция между оксидом углерода, углеродом и оксидами железа. При этом в конечном итоге практически весь входящий в технологическую цепочку углерод переводится в  $CO_2$  и лишь малая доля остаётся в готовой металлопродукции.

Большая часть заходящего в производственную схему металлургического предприятия пол-



ного цикла углерода так или иначе переходит в CO<sub>2</sub>. Сравнивая схемы производства, стали в доменной и электродуговой печи (BOF и EAF) – вторая схема более выигрышна по причине меньшего потребления ресурсов и пониженных удельных выбросов. Очевидно, что использование вторичного метал сырья дает меньшую нагрузку на окружающую среду.

Выделяется два основных направления по снижения выбросов углерода при производстве стали: а) увеличение доли электрометаллургии, б) понижение углеродоёмкости цепочки доменных печей BF-BOF.

Электрометаллургия более привлекательна по причине лучшей управляемости по сравнению с непрерывно действующим доменным и коксохимическим производствами. Однако для электрометаллургии требуются значительные капитальные вложения в перевооружение существующих производственных цепочек. Важнейшим ограничивающим фактором электрометаллургии является отсутствие достаточного количества вторичного метал сырья требуемого качества. Качество оборотного лома имеет естественную тенденцию к ухудшению за счет накопления примесных элементов, таких как Cu, Ni, As, Pb, Sn, Sb, Mo и Cr. переработка вторичного метал сырья требует применения качественных схем его сбора и сортировки.

Вторичные ресурсы в производственном цикле являются серьезным преимуществом. Максимальное вовлечение вторсырья в производственные процессы с целью экономии ресурсов и снижения нагрузки на окружающую среду – это тренд экономик мира.

Для производства стали приемлемого качества потребуются использование более чистого исходного сырья – прямовосстановленного железа (ПЖ). При этом следует учитывать доступность этого материала на рынке. ПЖ относительно редкий компонент подготовленного к переплавке лома.

Начало промышленного производства железа прямого восстановления относится к 1969 году, когда были установлены первые модули по производству ПЖ на территории США. Тогда к основными преимуществам альтернативной металлургии относили:

- отсутствие необходимости в производстве доменного кокса;
- более низкие капитальные затраты на строительство установок по производству прямовосстановленного железа;
- возможность создания более мобильных в части операционных затрат связей «модуль ПЖ – ДСП-печь».

Существуют барьеры, не позволяющие установкам прямого восстановления железа вытеснить традиционный способ производства стали:

- Низкая удельная производительность модулей ПЖ;
- Необходимость в более качественном исходном железосодержащем сырье;
- Наличие достаточных запасов дешевых источников для получения газообразных восстановителей (природный газ, уголь).

С учётом указанных ограничений процессов производства наибольшую распространенность альтернативные способы металлургии получили в странах, с одной стороны, обладающих достаточными запасами природного газа, угля и железной руды, с другой – не имеющих развитой классической металлургии. В настоящее время лидерство по производству ПЖ продолжают удерживать Индия, Иран, Россия, Мексика, Саудовская Аравия.

Использование горячбрикетированного железа (ГБЖ) в доменном производстве. Проведённые промышленные испытания технологии использования ПЖ в доменных печах показывают, что при использовании 100 кг ГБЖ в доменной печи расход углерода в виде кокса снижается на 34 кг/т чугуна. Снижение удельного расхо-

**Таблица 3.**  
Погрешности при методах расчетов выбросов CO<sub>2</sub> металлургического производства.

Метод	Источник данных	Погрешность
Первый метод расчета	Коэффициенты выбросов по умолчанию	25%
	Национальные данные о производстве	10%
Второй метод расчета	Углеродное содержание по умолчанию для конкретного материала	10%
	Национальные данные о восстановителях и технологических материалах	10%
Третий метод расчета	Данные, о технологических материалах, полученные от компаний	5%
	Данные измерений CO <sub>2</sub> от конкретных компаний	5%
	Коэффициенты выбросов для конкретных компаний	5%

да кокса сопровождается сокращением выхода колошникового газа и снижения содержания CO<sub>2</sub> в нём. Как показывают эксперименты проведенные американской компанией Voestalpine, производительность доменной печи при этом увеличивается на 6%.

Ограничивающим фактором использования ПЖ в доменном производстве является экономический – в силу более высокой стоимости ГБЖ относительно железорудного сырья. В настоящее время экономически эффективное применение ГБЖ возможно во внутрикорпоративном сегменте, когда его производитель находится в одном интегрированном холдинге с производителем чугуна. Но с введением «углеродных пошлин» на сталь использование горячебрикетированного железа в доменных печах может стать более распространённым и экономически выгодным элементом с учётом его более низкой «углеродной нагрузки» на окружающую среду.

Также одним из основных преимуществ применения ГБЖ является то, что это может быть реализовано без дополнительных капитальных затрат.

Вдувание коксового и доменного газов в доменные печи давно рассматривались в качестве технологического средства снижения удельного расхода кокса. Первые промышленные опыты проводились в 1960-х годах во Франции и Японии.

Для эффективного вдувания доменного газа необходимо максимально возможное снижение содержания CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O. Коксовый газ в этом отношении гораздо более технологичен – содержание CO<sub>2</sub> в нём составляет около 3%. Коксовый газ для комбината полного цикла может стать одним из значимых факторов снижения «углеродного следа». Например, в Европе компания ArcelorMittal анонсировала технологию вдувания коксового газа на своём комбинате в Испании. А компании Dillinger и Saarstahl на своём комбинате Rogesa строят завод по конверсии коксового газа для вдувания в доменные печи. В будущем установка позволит использовать во-

дород, полученный по «зелёным» технологиям. По разным оценкам вдувание 100 м<sup>3</sup> коксового газа на тонну чугуна позволит снизить потребление углерода кокса на 35 кг/т чугуна.

Улучшение качества железорудной исходной смеси для доменной печи является фактором, снижающим удельное потребление кокса. Принято считать, что увеличение содержания железа в доменной шихте на 1% ведёт к сокращению удельного расхода кокса также на 1%.

Улучшение качества кокса. Удельный расход кокса в доменном производстве, прежде всего, зависит от качества самого доменного кокса. Улучшение показателей холодной и горячей прочности, зольности могут в значительной степени сократить потребление кокса в доменном производстве.

Обессеривание чугуна за пределами доменной печи. Технологический парадокс борьбы с серой в доменной печи заключается в том, что для снижения содержания серы в чугуне приходится увеличивать расход кокса. При этом, основным поставщиком серы в доменной исходной смеси является сам кокс – он обеспечивает от 75% до 90% от общего поступления серы в доменную печь. Таким образом снижение каждой следующей тысячной доли содержания серы в чугуне обходится гораздо дороже.

Перспективны внешние установки десульфурации, использующие различные обессеривающие агенты. Ещё одним эффектом переноса процесса обессеривания чугуна из доменной печи в установку десульфурации чугуна будет снижение избыточного офлюсования агломерата и снижение потребления флюсов, которые также являются источниками выбросов CO<sub>2</sub>.

Ещё одним потенциальным сегментом улучшения углеродного баланса металлургического предприятия является использование возможностей по сохранению и использованию энергии отходящих газов. Сокращение вредных прососов в агломерационном производстве, исключение

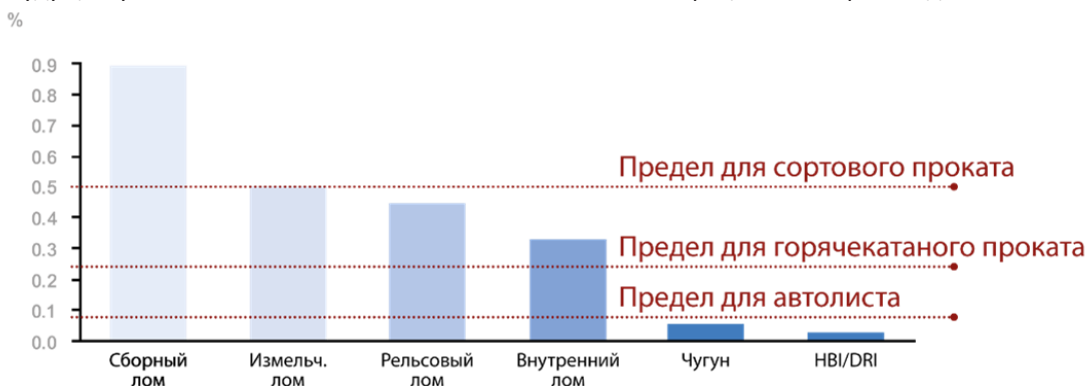


Рис. 5. Содержание примесных элементов в различных видах метал сырья.

потерь тепла в процессе обжига исходной смеси, утилизация отходящих газов конвертерного производства, использование газгольдеров для сбора и гомогенизации состава отходящих технологических газов – эти и многие другие способы сокращения энергетических потерь могут сделать металлургическое предприятие производителем электроэнергии и тепловой энергии, а не источником химического и теплового загрязнения окружающей среды.

Применение перечисленных практик может позволить сократить удельные выбросы углерода на 16% или на 84 кг на тонну стали.

Следует учитывать, что снижение расхода кокса будет сопровождаться сокращением выработки доменного газа, который на многих предприятиях используется в различных производствах – от агломерационного до прокатного – в качестве топливного компонента. Такое сокращение одного из основных топливных компонентов может сказаться на энергетическом балансе действующего предприятия и это необходимо учитывать при рассмотрении «зеленых» проектов.

Повышение энергоэффективности и сокращения выбросов парниковых газов металлургического производства связано с совершенствованием технологической структуры предприятия. Значительное сокращение выбросов

парниковых газов и, в целом, энергоемкости продукции возможно при внедрении технологий внедоменного получения железа. С точки зрения декарбонизации эта технология более эффективна по сравнению с агломерационным производством или выплавкой конвертерной стали для процессов жидкофазного восстановления и твердофазного восстановления. В исследовании были выявлены следующие закономерности:

- Выбросы в процессах жидкофазного восстановления значительно выше выбросов при производстве доменного чугуна и энергоемкости доменного чугуна;
- Процессы жидкофазного восстановления обладают высоким потенциалом образования вторичных энергоресурсов, утилизация которых компенсирует часть возникающих выбросов;
- Выбросы парниковых газов при производстве железа в твердофазных процессах, существенно ниже по сравнению с доменным чугуном;
- Энергоемкость электростали, выплавленной с использованием железа твердофазных процессов сопоставима с конвертерной сталью при высокой доле утилизации вторичных энергоресурсов доменного передела.
- Одновременное применение кислородных конвертеров с электродуговыми печами позволяет снизить эмиссию диоксида углерода до 20 %.

Литература

1. Akbostanci, E., Tunç, G. İ., & Türüt-Aşık, S. (2011). CO2 emissions of Turkish manufacturing industry: a decomposition analysis. *Applied Energy*, 88(6), 2273-2278.
2. Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
3. Elmarakbi, A. (2013). *Advanced composite materials for automotive applications: Structural integrity and crashworthiness*. John Wiley & Sons.
4. Hasanbeigi, A., Arens, M., Cardenas, J. C. R., Price, L., & Triolo, R. (2016). Comparison of carbon dioxide emissions intensity of steel production in China, Germany, Mexico, and the United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 113, 127-139.
5. Katashov A., Ovchinnikov K., Maliavko E., Tatarinov D., Ogienko V. (2021). Digital platform as a tool for efficient reservoir management. *First Break*. T. 39. № 7. С. 57-61
6. Ryan, N. A., Miller, S. A., Skerlos, S. J., & Cooper, D. R. (2020). Reducing CO2 emissions from US steel consumption by 70% by 2050. *Environmental Science & Technology*, 54(22), 14598-14608.
7. Zhao, Y., Zuo, H., She, X., Wang, G., & Wang, J. (2018). Key factors of CO2 emission analysis in iron and steel mill.
8. Овчинников К. (2022). Экономика проектов геологического захоронения CO2 с целью повышения нефтеотдачи, *Нефтегазовая вертикаль*, №6
9. Овчинников К.Н. (2019). Задачи разработки месторождений и бурения, решаемые с помощью технологии маркерной диагностики профилей притоков скважин. *Нефть. Газ. Новации*. № 2. С. 71-77
10. Овчинников К.Н. (2022). Перспективные технологии для улавливания, мониторинга и предотвращения утечек CO2 из геологических хранилищ, *Нефтегазовая Вертикаль*. № 7-8. с. 48-58.
11. Овчинников К.Н. (2022). Карбоновый след мировой цементной промышленности. факторы влияния, тренды и потенциал по снижению недропользование XXI век. № 4 (96). с. 127-137.

UDC 620.9, 550.9, 669

K.N. Ovchinnikov, PhD, Associate Professor, Head of CCUS discipline Ufa State University, kirill.ovchinnikov@energycc.org

## THE CARBON FOOTPRINT OF THE METALLURGICAL INDUSTRY AND AN OVERVIEW OF SOLUTIONS FOR ITS DECARBONIZATION IN CHINA, THE USA AND GERMANY

**Abstract:** This article offers an analysis of technologies to reduce greenhouse gas emissions from key major steel producing countries – the United States, China and Germany. Particular attention is paid to the analysis of reducing greenhouse gas emissions in ferrous metallurgy by switching from a blast-furnace converter to an electric steelmaking process using direct reduced iron.

**Keywords:** decarbonization, carbon footprint, CO2 emissions reduction, CO2 storage, low carbon energy.