

УДК 504.7

«УГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД» В МЕТАЛЛУРГИИ И ОГНЕУПОРНОЙ ОТРАСЛИ

Рассмотрены проблема выброса парниковых газов («углеродный след») в разных отраслях промышленности и усилия разных стран, в том числе России, направленные на сокращение выбросов CO₂. Приведены источники образования углеродного следа и технологии, позволяющие сократить выбросы CO₂ в доменном и сталелитейном производстве России, а также технологии улавливания CO₂, применяемые в некоторых других отраслях. Даны рекомендации по снижению углеродного следа в огнеупорном производстве.

Ключевые слова: «углеродный след», углеродный налог, «зеленые» источники энергии, снижение выбросов CO₂, технологии улавливания CO₂.

В XXI веке проблема выброса парниковых газов стала одной из ведущих тем для человечества. В природе могут начаться необратимые процессы, связанные с повышением глобальной температуры окружающей среды. В настоящее время человек пока еще может повлиять на процесс увеличения содержания парниковых газов в атмосфере и принять необходимые решения для торможения роста парникового эффекта [1].

В соответствии с Парижским соглашением более 190 стран взяли на себя обязательства по смягчению последствий выбросов CO₂ и приняли национальные программы. Ведущим регионом в вопросах снижения углерод-содержащих выбросов является Европейский союз (ЕС), который уже выполняет требования Парижского соглашения. Он имеет самые низкие выбросы парниковых газов на единицу ВВП из всех основных мировых экономик и входит в число регионов с низким средним уровнем выбросов парниковых газов на душу населения.

«Углеродный след» представляет собой совокупность всех выбросов парниковых газов, произведенных прямо и косвенно организацией, отдельным человеком или продуктом. В 2021 г. эксперты из семи ведущих научных организаций из США и Европы изучили и оценили

десятки существующих способов улавливания, переработки и использования CO₂. В результате анализа были определены возможные объемы улавливания и приемлемая для организации производства себестоимость изъятый из атмосферы 1 т углекислого газа. По расчетам этих экспертов, человечество может ежегодно улавливать около 10 Гт CO₂ при себестоимости этого процесса на уровне 100 долл. / т уловленного CO₂. Для сравнения: выбросы CO₂ ежегодно увеличиваются более чем на 1 % и в 2018 г. достигли рекордного уровня — 37 Гт CO₂.

В мире наибольший углеродный след и выделения CO₂ образуются в энергетическом секторе (25 %), лесном секторе и сельском хозяйстве (24 %), в промышленности (21 %), автомобильном транспорте (14 %), в других видах транспор-



Рис. 1. Углеродный след планеты (источник: VK.Com, 15.02.2020: Винштейн, Илья. Углеродный след и сельское хозяйство / Илья Винштейн // Блог И. Винштейна)

✉
В. А. Кононов
 E-mail: kvant2404@mail.ru

та (9,6 %), в жилом секторе (6,4 %) (рис. 1). Среди стран Россия по наличию углеродного следа находится на пятом месте после Китая, США, ЕС, Индии (см. рис. 1). Все ведущие страны в настоящее время принимают меры по снижению выбросов CO₂:

- Китай климатической нейтральности планирует достичь только в 2060 г.;

- США пообещали сократить парниковые выбросы до 50 % к 2030 г. от уровня 2005 г., а к 2050 г. достигнуть климатической нейтральности;

- ЕС пытается решать свои проблемы, связанные с экополитикой, за счет других государств. Во всех странах Европы уже вводится или создаются условия для введения «зеленого» налога, который позволит компенсировать затраты разных европейских компаний, в том числе и металлургических, на разработку проектов безуглеродной металлургии;

- Индия к 2030 г. будет вырабатывать 450 ГВт мощности ВИЭ (возобновляемыми источниками энергии);

- Россия — единственная страна в мире, которая в настоящее время сократила выбросы CO₂ до 70 % от уровня 1990 г. Сегодня 45 % энергобаланса России составляют низкоэмиссионные источники энергии, в том числе и атомная генерация.

Выбросы парниковых газов в России сократились за 30 лет от 3,1 млрд т до 1,6 млрд т в год эквивалента CO₂. Кроме того, наша экосистема поглощает 2,5 млрд т, и Россия фактически давно достигла климатической нейтральности. Несмотря на эти достижения, пилотным регионом в стране по решению проблемы снижения выбросов CO₂ правительство РФ определило Сахалин, который уже к 2025 г. до-

стигнет климатической нейтральности местной экосистемы.

В настоящее время в России существует значительный углеродный след. Это связано с сочетанием сразу нескольких факторов:

- основным российским экспортным товаром являются газ, нефть и металлы, при добыче и производстве которых затрачивается много электрической и тепловой энергии;

- значительное количество энергии затрачивается для прокачивания нефти и газа по трубопроводам.

Доля металлургии в мировом масштабе выбросов парниковых газов оценивается в 7–9 %. В ЕС многие сталелитейные компании включились в освоение новых технологий, позволяющих без снижения объема производства сократить потребление и выбросы CO₂.

Все новые проекты в металлургии основаны на двух принципах — замещение углеродного сырья на водород или улавливание выбросов CO₂:

- + в ЕС крупные металлурги внедряют проекты по производству стали на основе водорода (SSAB, Voestalpine, Tata Stell, ArselorMittal и др.);

- + внедряется комбинированная технология с использованием природного газа и последующим улавливанием CO₂. Компания ThyssenKrupp (TKS) благодаря улавливанию и связыванию CO₂ сократит его выбросы к 2030 г. на 30 %. Специалисты считают, что расходы на улавливание 1 т выделяемого CO₂ снизятся до 40–57 долл. в течение ближайших нескольких лет;

- + разработка новых безуглеродных технологий производства стали. Ожидается, что к 2050 г. из-за освоения этих технологий будут значительно увеличены затраты европейских

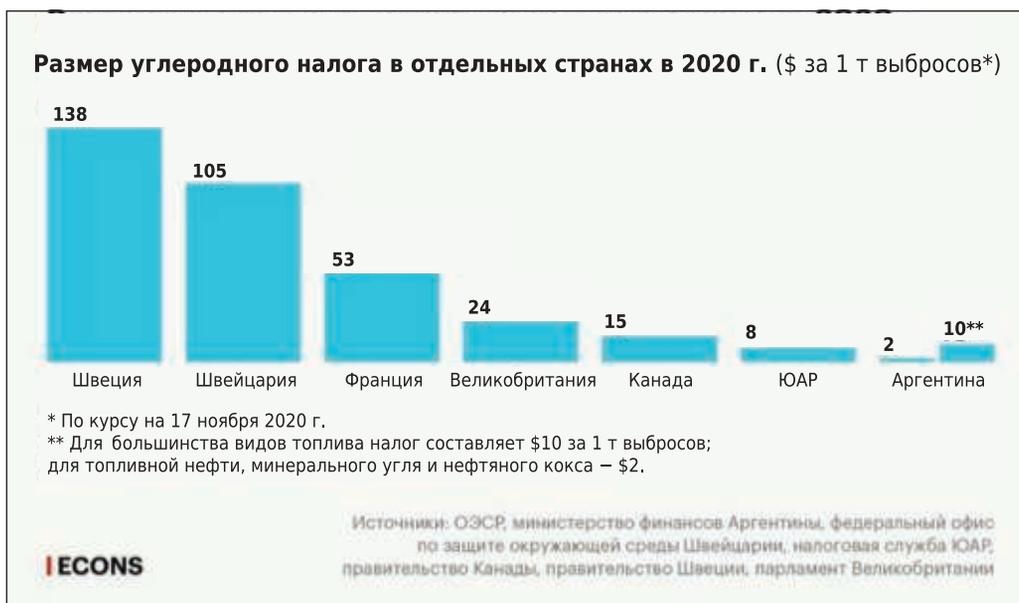


Рис. 2. Размер углеродного налога в некоторых странах

металлургических компаний (на 50–100 %). По оценкам компании ArcelorMittal, ее затраты на достижение углеродно-нейтрального баланса к 2050 г. могут достичь 40 млрд евро.

В Европе и мире уже внедряется углеродный налог, который в разных странах значительно различается. Сегодня за выброс 1 т CO₂ в мире в среднем придется заплатить квоту в размере 54 долл. США. В 2019 г. средняя ставка за выброс углерода в Европе составляла 25 евро за 1 т, а сейчас во многих странах превышает 40 евро (рис. 2).

Начиная с 2023 г. ЕС введет специальный углеродный налог для зарубежных компаний, поставляющих продукцию на его рынок. В первую очередь он коснется экспортеров нефти, газа, продукции нефтехимии, металлургии, удобрений, а также цемента. При производстве этих продуктов выделяется значительное количество парниковых газов. Следует отметить, что в Европе в настоящее время идут ожесточенные дебаты между европейскими чиновниками из Брюсселя и представителями энергетических и металлургических компаний, которые требуют изменений в вопросах и условиях введения углеродного налога. По мнению руководителей ЕС, основная тяжесть нового «экологического бремени» при поставке на рынок стального импорта в Европу должна лечь на основных поставщиков металлопродукции (рис. 3): Россию и страны СНГ (38 %), Китай (8 %) и Турцию (8 %). От возможных штрафов могут серьезно пострадать крупные металлургические предприятия России (НЛМК, Северсталь, ММК и др.). Подсчитано, что производители стального проката из-за введения углеродного налога могут потерять до 40 % прибыли, производители целлюлозы до 60 %, а экспортеры сырой нефти до 20 %. Государство будет вынуждено идти навстречу олигархам и снижать для них налоговую нагрузку, что значительно снизит отчисления в бюджет от НДС и экспорта.

По итогам 2019 г. объем экспорта углеродоемких товаров России в ЕС составляет около 13 %, или 57 млрд долл. Экспорт из Китая составляет 41 млрд долл., из США 32 млрд долл. [2]. Исходя из объема импорта 2020 г., налог затронет российские поставки в ЕС на сумму почти 7 млрд евро, а в натуральном выражении 16,3 млн т. Для России налог будет фактически равнозначен дополнительной адвалорной пошлине в 16 % от стоимости товаров (1,1 млрд евро от 7 млрд евро).

Больше всего предстоит заплатить за ввоз из России стали (655 млн евро) и азотных удобрений (398 млн евро). Из-за углеродного налога возникает недобросовестность конкуренции, которая состоит в том, что ЕС и США навязывают всем остальным странам выгодные только для себя условия без учета особенностей других

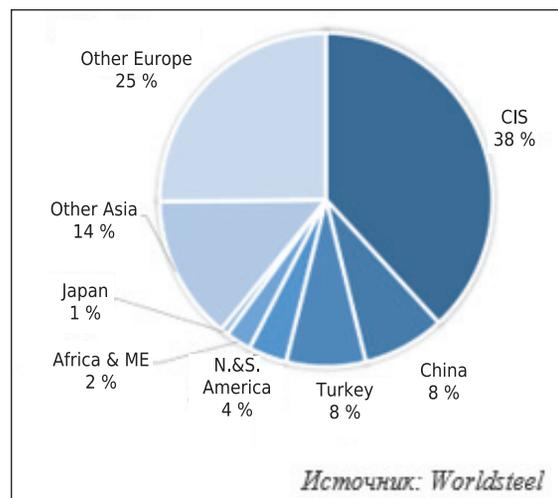


Рис. 3. Импорт металлопродукции в Европу [1]

стран [3]. Например, в Дании учитывается фактор близости к морю, и на его берегах в стране строятся ветровые электростанции. У тропической Бразилии много тростника, из которого страна делает биомассу для использования в качестве топлива автомашин. В этой стране транспорт использует топливо, состоящее на смеси бензина (20 %) и биоэтанола (80 %). Поэтому для учета интересов Бразилии мировые автоконцерны создали специальные автомобили, учитывающие ее специфику. В России имеются большие запасы природного газа, который экономически и экологически является более выгодным топливом для применения. Для нашей страны более перспективно развитие газомоторного топлива, а затем «бирюзового водорода».

Но Европа дает зеленый свет только тем, кто строит ветряные, солнечные и малые гидроэлектростанции. Выгода ЕС заключается в том, что он производит оборудование для этих станций и своим экологическим налогом мотивирует другие страны покупать у него это недешевое оборудование. Формат торговли подгоняется под тот формат, который выгоден Европе. Поэтому в Европе умышленно игнорируются преимущества атомной энергетики с отсутствием выбросов CO₂, лидерами в которой являются Россия и Китай.

Кроме того, в США и Европе существует протекционизм и государство субсидирует производство электромобилей, облагая обычные автомобили на бензине повышенным налогом [4]. Обычный автомобиль за срок своей жизни выбрасывает примерно 20–25 т CO₂. Нейтрализовать этот объем CO₂ можно с помощью фильтров-катализаторов стоимостью 6 тыс. долл. В настоящее время это значительно дешевле, чем приобретение электромобиля. Кроме того, человечеству проще перевести угольные станции в развивающихся странах на газ, и это позволит

экономить больше CO₂, чем выбросы всего мирового транспортного потока.

Энергетика ВИЭ (возобновляемые источники энергии) до сих пор не может существовать без субсидий и безграничного финансирования. На саммите по зеленой энергетике в апреле 2021 г. США пытались заставить РФ стать мировым лидером по закрытию угольных ТЭЦ. Однако России это невыгодно, так как значительная часть Сибири (Красноярск, Иркутск и др.) не имеет газоснабжения и использует угольные ТЭЦ, перевод которых на газ требует огромных затрат.

Предполагаемое внедрение «карбоновой удавки» начнет давить на нашу сырьевую экспортно-ориентированную экономику уже через два года. Возможны три варианта снижения этого давления:

1 — на переходный период можно использовать механизм взаимного погашения квот на выбросы CO₂, которые «на бумаге» делают продукцию климатически нейтральной;

2 — начать программу комплексной реиндустриализации российской экономики и внедрения «зеленых» источников энергии при производстве продукции для ее диверсификации и снижения зависимости от экспорта углеводородного сырья;

3 — путем переговоров с Европой добиваться при определении налоговой службой учета положительного для РФ «лесного фактора». Тогда при превышении объема выбросов отечественные производители смогут их компенсировать за счет высадки новых и восстановления выгоревших лесов. Для нашей многострадальной тайги это стало бы большим благом [5].

Европа заинтересована в энергоносителях из России и поэтому в своих действиях, вероятно, не станет переходить ту черту, которая делает рынок убыточным для российских компаний.

Новая экологическая пошлина может быть применена как для государств, так и для отдельных металлургических компаний. При этом с точки зрения правильности подхода и здравого смысла более справедливым является второй принцип — применение индивидуальных пошлин для каждой компании. Так как при применении «странового» налогообложения все производители региона будут попадать под действие нового «эконалога» и при отсутствии поддержки со стороны своего государства у металлургических компаний и холдингов не будет стимулов к развитию безуглеродных технологий. Независимо от вкладываемых компанией средств в снижение собственного углеродного следа налоговое бремя будет для всех компаний данного региона одинаковым. При использовании индивидуального налогообложения у каждой металлургической компании будет стимул

к усилению своей активности, направленной на сокращение нагрузки на окружающую среду, в надежде на последующее справедливое изменение ставки «эконалога».

Ведущие мировые производители стали (ArcelorMittal, Blue Scope, Voestalpine AG и др.) совместно с крупными автопроизводителями (Daimler, BMW и др.) в конце 2020 г. объявили о запуске первого в мире международного многостороннего стандарта ResponsibleSteel™ для сталеплавильных и металлоперерабатывающих предприятий. Новый стандарт включает 12 принципов: корпоративное лидерство; природоохранные, социальные и управленческие методы; охрана труда и техника безопасности; права рабочих; права человека; взаимодействие с заинтересованными сторонами и коммуникация; местные сообщества; изменение климата и выбросы парниковых газов; шум, выбросы, сточные воды и отходы; управление водными ресурсами; биоразнообразие; вывод из эксплуатации и закрытие.

Некоторые крупные металлургические холдинги (ArcelorMittal, Salzgitter) уже в этом году планируют сертифицировать часть своей конечной продукции как «lower emissions steel» или «certified green steel». В случае успешной реализации новых стандартов сертификации «зеленой стали» российские компании также смогут индивидуально получать соответствующие сертификаты от независимых аудиторов.

УГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ РОССИИ

Сталь в большинстве стран мира и в России производится по двум основным технологическим цепочкам:

1. Производство стали, основанное на процессе восстановления железорудного сырья в доменной печи (BF) с последующим выжиганием углерода из чугуна в кислородно-конвертерном процессе (BOF).

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

Наибольшая часть выбросов углерода наблюдается в процессе восстановления железа. При этом происходит химическая реакция между оксидом углерода, углеродом и оксидами железа и в конечном итоге практически весь входящий в технологическую цепочку углерод переводится в CO₂. Более высокое потребление природных ресурсов и более высокие выбросы при производстве стали приходятся на первый вариант производства стали.

Исходя из этого, созданы два основных метода снижения выбросов углерода при производстве стали: увеличение доли электро-

металлургии или снижение углеродоемкости цепочки BF–BOF. В металлургии наибольшие выбросы CO₂ происходят в доменном процессе получения чугуна (рис. 4), при котором выделяется 2,3 т CO₂ / т стали, в конвертерном производстве в зависимости от технологии выделяется 0,9–1,1 т CO₂ / т стали. Наименьшие выделения CO₂ происходят при выплавке стали в электродуговых печах (0,1–0,4 т CO₂ / т стали).

Углеродный след в доменном производстве

В доменном процессе существует несколько улучшенных технологий, при применении которых вместо 2,3 т CO₂ выделяется 1,9 т CO₂ / т стали. В России существующие в настоящее время доменные печи большинства российских металлургических компаний могут бесперебойно работать до проведения затратных капитальных ремонтов в течение 10–15 лет. Поэтому сейчас производить реконструкцию многих из этих печей пока не эффективно.

В мировой практике и в России существуют следующие технологии снижения выбросов CO₂ в доменном производстве:

1. Вдувание коксового и доменного газов. Это позволяет снизить удельный расхода кокса. Коксовый газ является более технологичным, так как содержание в нем CO₂ составляет около 3 %. Высокое содержание водорода (до 60 %) в этом газе позволяет резко снизить углеродный след. Компания ArcelorMittal вдувает коксовый газ на своем комбинате в Испании. В будущем можно использовать водород, полученный по «зеленым» технологиям. По разным оценкам, вдувание 100 м³ коксового газа на 1 т чугуна позволит снизить потребление углерода кокса на 30–35 кг/т чугуна.

2. Улучшение качества железорудной шихты. Улучшение качества железорудной шихты снижает удельное потребление кокса.

3. Улучшение качества кокса. Улучшение показателей зольности, а также холодной и горячей прочности кокса сокращает его потребление.

4. Перенос функции обессеривания чугуна за пределы доменной печи. Для снижения содержания серы в чугуне увеличивают расход кокса, который обесщелачивает удаление 75–90 % общего поступления серы в доменную печь. Зарубежные металлурги выносят процесс обессеривания за пределы доменной печи и устанавливают внешние агрегаты десульфурации с использованием разных обессеривающих агентов.

5. Использование тепловой и химической энергии отходящих технологических газов.

Применение перечисленных технологий позволит сократить удельные выбросы углерода в доменном производстве на 16 %, или на 84 кг / т стали [1].

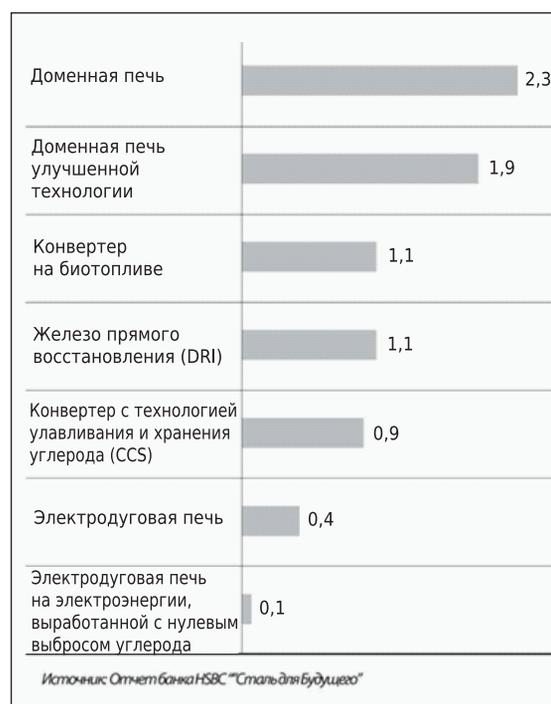


Рис. 4. Выбросы CO₂ на отдельных передельных этапах металлургии (указаны в т CO₂ / т стали)

Для производства стали приемлемого качества необходимо использование более чистого исходного сырья — прямовосстановленного железа (DRI). Это способствует созданию альтернативной металлургии и имеет следующие преимущества:

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

В настоящее время мировое лидерство по производству DRI удерживают Индия, Россия, Иран, Мексика и Саудовская Аравия. Объем годового производства DRI в 2019 г. в мире вырос на 7 % относительно 2018 г. и составил 108 млн т. В России в 2019 г. было произведено 52 млн т окисленных железорудных окатышей. Для получения качественного DRI требуется качественное железорудное сырье. Проведенные промышленные испытания технологии использования DRI в доменных печах показывают, что при использовании 100 кг горячебрикетированного железа в доменной печи расход углерода в виде кокса снижается на 34 кг/т чугуна, а производительность доменной печи при этом увеличивается на 6 %. Крупнейшими производствами окатышей в России и СНГ являются:

– Лебединский ГОК (Белгородская обл.) — единственный в России и СНГ производитель ГБЖ. Поставляет окатыши для ОЭМК;

– Качканарский ГОК (Свердловская обл.) — поставщик окатышей для ЕВРАЗ;

– Костомукшский ГОК (Карелия) — поставщик окатышей для Северстали;

– Михайловский ГОК (Курская обл.) — поставщик окатышей для компании «Металлоинвест».

Российские ГОКи поставляют окатыши как на внутренний рынок, так и на экспорт (15–35 % продукции в Китай, Турцию и в другие страны).

НЛМК в июле 2021 г. начал строительство нового горно-металлургического производства в Белгородской обл. на базе Стойленского (Старооскольского) горно-обогатительного комбината. Новый завод станет крупнейшим в мире по производству железорудного сырья и начнет ежегодно выпускать до 3 млн т горячебрикетированного железа (ГБЖ). Завод будет введен в строй в 2027 г. Кроме того, аналогичный завод в Курской обл. мощностью 2 млн т построит компания «Металлоинвест». Выпуск окатышей на новых заводах будет экологически чистым, поскольку в процессе производства ГБЖ в атмосферу выбрасывается лишь водяной пар, применяемый для охлаждения брикетов.

В настоящее время в отечественной металлургии принимаются меры по снижению выбросов CO₂. ММК по проекту люксембургской компании Paul Wurth в 2024 г. запустит в работу доменную печь № 11. Это позволит к 2025 г. сократить выбросы в атмосферу на 26,3 тыс. т в год. В 2022 г. на ММК планируют также запустить совместно с китайской компанией Sinosteel Equipment & Engineering Co. Ltd новую коксовую батарею № 12 мощностью 2,5 млн т сухого кокса в год. Новый комплекс позволит вывести из работы пять устаревших коксовых батарей и сократить выбросы в атмосферу пыли на 21 %, формальдегида в 9 раз, бенз(а)пирена в 12 раз.

Углеродный след при переплавке стали в электродуговых печах

Данный способ производства стали по сравнению с другими способами отличается наименьшими выбросами CO₂ в атмосферу. Электрометаллургия, несмотря на преимущество по сравнению с непрерывно действующим доменным и коксохимическим производствами, также имеет ограничивающие факторы:

1. Требуется большие капитальные вложения в перевооружение действующей производственной цепочки.

2. Недостаток в России количества металлолома требуемого качества по содержанию

примесных элементов (Cu, Ni, As, Pb, Sn, Sb и др.).

В новых металлургических проектах Россия учитывает необходимость снижения выбросов CO₂. В г. Выкса (Нижегородская обл.) в 2025 г. заработает новый электрометаллургический комплекс «Эколант» мощностью 1,8 млн т стали. Здесь будет применена технология DRI для производства металлизованных окатышей; не будет коксохимических, доменных, конвертных процессов и предусматривается уменьшение давления производства на экологию. Выбросы парниковых газов в атмосферу будут снижены в 3 раза. Данный метод будет экономить производителю затрачиваемую энергию и позволит сэкономить до 140 кВт·ч/т. Все выделенные газы за счет тепла отходящих газов будут генерироваться в энергию и позволят дополнительно получать ее в объеме 24 МВт.

Несмотря на существующие неопределенности в области будущего углеродного налога в РФ все лидеры металлургического рынка активно работают в направлении снижения углеродного следа.

НЛМК. Удельные выбросы НЛМК в 2020 г. составили 1,91 т CO₂ / т стали, а при производстве чугуна этот показатель составил 1,39 т CO₂-эквивалента. Эти значения соответствуют уровню наилучших технологий России, но на 5 % хуже, чем в ведущих металлургических компаниях ЕС. НЛМК планирует сократить это отставание до 3 %.

ММК. В 2020 г. удельная углеродоемкость жидкой стали составила 2,18 т CO₂-эквивалента/т стали. План по снижению показателей к 2025 г. — до 1,8 т CO₂-эквивалента/т. ММК планирует достичь снижения валовых выбросов загрязняющих веществ в 3 раза по сравнению с 2020 г.

Северсталь. В 2019 г. удельные выбросы парниковых газов Северстали составили 2,08 т CO₂-эквивалента / т жидкой стали, к 2023 г. предприятие намерено уменьшить интенсивность выбросов парниковых газов на 3 % по сравнению с 2020 г.

ЕВРАЗ. Еще в 2018 г. ЕВРАЗ запустил самую чистую доменную печь в Европе на НТМК. В этой печи система аспирации с помощью 5900 фильтров очищает отходящие при выплавке чугуна газы. В 2020 г. предприятию удалось снизить удельные выбросы до 1,97 т CO₂-эквивалента / т сырой стали. В ближайшие 10 лет предприятие планирует снизить этот показатель на 20 %.

Металлоинвест. Предприятие применяет в производстве технологию прямого восстановления железа и выплавки стали в электропечах. До 2036 г. планируется сократить прямые выбросы парниковых газов на 15 % относительно уровня 2019 г. К 2050 г. Metalloinvest рассчитывает достичь углеродной нейтральности.

Мечел. В 2020 г. модернизированы доменная печь и конвертер, что позволило более чем на 30 % сократить выбросы парниковых газов.

Углеродный след в огнеупорной отрасли

Огнеупорная отрасль, как и металлургия, значительно влияет на экологию и состояние окружающей среды. Процесс производства огнеупоров приводит к выбросу органических твердых частиц и вредных газов, таких как SO_2 , NO_x , CO , CO_2 , фториды и летучие органические вещества. Процессы дробления, измельчения, кальцинирования и сушки приводят к выбросу твердых частиц, в то время как газы и органика выделяются в процессе обжига сырья и изделий или операций с синтетической связкой. При производстве огнеупорных материалов углеродный след обнаруживается в следующих случаях:

Выделения CO_2 из огнеупорного сырья.

При обжиге природных углеродсодержащих материалов (сырой магнезит, доломит, известняк и др.) происходит дополнительное выделение CO_2 из сырья. При обжиге магнезита во вращающихся печах на комбинате «Магнезит» в продуктах сгорания образуется 14–18 % CO_2 .

В соответствии с национальным докладом РФ о кадастре антропогенных выбросов CO_2 при производстве спеченного магнезита из природного сырья выбросы CO_2 оценивались в соответствии с методикой уровня 2 МГЭИК (IPCC, 2006 г.). В процессе обжига магнезита CO_2 из исходного сырья выделяется полностью в атмосферу. При расчетах выделений CO_2 используется коэффициент выбросов МГЭИК (международная группа экспертов по изменению климата), основанный на соотношении молекулярных весов магнезита и CO_2 и равный 0,522 т CO_2 /т использованного природного магнезита. При оценке выбросов CO_2 при обжиге известняков и доломитов использовали по умолчанию коэффициенты эмиссии, равные 0,440 т CO_2 /т известняка и 0,477 т CO_2 /т доломита (IPCC, 2006 г.), рассчитанные на основании стехиометрических уравнений для химически чистых известняков и доломитов [6].

Для сравнения: если при производстве спеченного периклаза во вращающихся печах выделяется до 18 % CO_2 , то при производстве плавленного периклаза в дуговых печах образуется всего 0,15 % CO_2 . Поэтому при производстве плавленных материалов (периклаз, шпинель, корунд и др.) углеродный след значительно меньше.

Выделения CO_2 из топлива, применяемого для обжига сырья и готовых изделий. В качестве топлива в огнеупорной отрасли России в основном применяется природный газ, в качестве резервного топлива — мазут. При обжиге любых видов огнеупорного сырья во вращающихся или шахтных печах при сгорании используемого топлива образуется CO_2 . В процессе

обжига разных видов огнеупорных изделий из применяемого топлива также выделяется значительное количество CO_2 , которое зависит от вида огнеупора, типа используемых печей и длительности обжига. Удельный расход топлива находится в пределах 0,1–0,2 т/т годных изделий. Повышенные количества CO_2 выделяются в процессе обжига изделий (муллитокорундовых, корундовых, периклазовых и др.) в высокотемпературных щелевых туннельных печах. Это связано с повышенным расходом топлива из-за длительного обжига.

Выделения CO_2 непосредственно из состава огнеупоров, в которые входят графит или углеродсодержащие добавки. Основным источником выделения CO_2 в этих огнеупорах является природный графит или углерод, получаемый из органических связующих, используемых в составе шихты. Выделения CO_2 данного типа в основном происходят непосредственно при эксплуатации огнеупоров. Огнеупорные изделия с добавками чистого высококачественного графита широко применяют при кладке современной футеровки металлургических агрегатов (конвертеры, электропечи, сталеразливочные ковши и др.) и имеют большие перспективы использования.

В мире добывается около 650 тыс. т в год природного графита, доля применяемого в огнеупорах наиболее дорогостоящего чешуйчатого графита составляет 59 %; добываемый аморфный графит (41 % добычи) применяется в основном в литейной промышленности. Таким образом, огнеупорное производство является основным потребителем графита и занимает 29 % рынка, литейная промышленность и производство тиглей 22 %, производство литий-ионных батарей 19 %, специальные отрасли применения, в том числе атомная и др., 12 %, производство смазок и покрытий 11 %, другие отрасли 7 % [6]. Размер углеродного следа зависит непосредственно от вида применяемых огнеупоров:

– **шамотнографитовые огнеупоры.** К этому классу огнеупоров относится производство тиглей, которые применяются при плавке цветных и черных металлов и сплавов. В основном эти изделия в РФ производит Лужский абразивный завод. Изделия состоят из 35 % чешуйчатого графита, 35–45 % огнеупорной глины и 10–30 % шамота. Из смеси этого состава изготавливают тигли и другие изделия, которые затем в закрытых муфелях обжигают при 800–1000 °С. Выбросы CO_2 происходят как в процессе обжига, так и при эксплуатации изделий при получении стали и сплавов;

– **изделия и массы для футеровки выпускных желобов доменных и сталеплавильных печей.** Эти массы содержат графит и пек, в также SiC (20–30 %), который в процессе эксплуатации этих масс также выделяет CO_2 .

Производство таких масс успешно организовало АО «Динур», и это позволило значительно улучшить экологию в доменном производстве РФ;

– **изделия для кладки лещади доменных печей.** Для кладки лещади доменной печи, а также электролизных ванн при производстве металлического магния и алюминия используют угольные и графитированные блоки, содержащие не менее 92 % С. Блоки в зависимости от вместимости печи имеют разные габариты (400×400×2000 мм и др.) и в процессе эксплуатации являются значительным источником выделений CO₂. Рабочую футеровку доменной лещади выкладывают из углеродных блоков, плотно укладывают их друг к другу для устранения проникновения жидкого чугуна. Износ углеродсодержащей футеровки доменной печи происходит вследствие окисления входящими в состав шлака расплавленными оксидами железа и марганца, а также водяным паром и диоксидом углерода, образующимися при сжигании кокса или поступающего в печь природного газа. Средний срок службы лещади доменной печи, футерованной углеродистыми огнеупорами, составляет 7–8 лет. Углеродсодержащие блоки в основном производит предприятия электродной промышленности;

– **углеродсодержащие изделия ответственного назначения для непрерывной разливки стали.** К этому классу огнеупоров относятся огнеупоры шибера узла (корундографитовые плиты для шибера затворов, ковшевые стаканы и стаканы-коллекторы) и изделия для МНЛЗ (стопоры-моноблоки, трубы для защиты от окисления и погружаемые стаканы). Плиты содержат 6–8 % углерода, входящего в состав шихты или синтетической связки. Огнеупоры для МНЛЗ в зависимости от зоны применения содержат более высокое количество углерода. Например, трубы для защиты струи металла от окисления содержат до 30 % углерода, стопоры-моноблоки и погружаемые стаканы 15–20 %. Весь углерод в этих изделиях является источником выделения CO₂. Для защиты углерода от выгорания в состав огнеупоров для МНЛЗ вводят разные добавки антиокислителей и контактную поверхность изделий покрывают слоем защитной глазури;

– **периклазоуглеродистые (ПУ) изделия для футеровки конвертеров, электропечей и сталеразливочных ковшей.** В этих видах углеродсодержащих огнеупорных материалов содержание углерода составляет 8–20 %. Функция углерода заключается в уплотнении пористой структуры, улучшении стойкости к действию шлака и металла за счет отсутствия смачивания. Кроме того, эти огнеупоры за счет высокой теплопроводности и низкого теплового расширения имеют повышенную стойкость к тепловому удару. Однако из-за

включения углерода в состав огнеупорных изделий они имеют пониженную механическую прочность и подвержены окислению углерода при высоких температурах. Последний фактор считается основным источником углеродного следа, создаваемого этим эффективным классом огнеупоров.

Высокая стойкость ПУ-изделий обусловлена их механизмом износа, основанным на образовании плотного слоя MgO на рабочей поверхности MgO–С-огнеупора (периклазоуглеродистого). Происходит реакция восстановления плавного MgO углеродом, входящим в состав органической связки, или углеродом из шихты. Оксид магния восстанавливается до Mg²⁺, который затем окисляется кислородом из расплавленной стали до MgO, в результате чего получается практически чистый MgO, который не взаимодействует с жидким металлом. Благодаря этому ограничивается проникновение шлака и металла внутрь огнеупоров и повышается его коррозионная стойкость.

Углерод в составе огнеупора обычно обладает пониженной стойкостью к окислению и может окисляться с образованием CO и CO₂, что приводит к возникновению пористой структуры, и снижает прочность и коррозионную стойкость. Выделяющийся CO₂ удаляется в атмосферу, образуя углеродный след. Снижение степени окисления углерода можно обеспечить введением в состав огнеупора разных антиоксидантов (порошки Al, Si, В и др.), которые вступают в реакцию с кислородом в составе стали. Антиоксиданты начинают окисляться и способствуют защите углерода с сохранением структуры и свойств огнеупора.

Несмотря на высокую эффективность ПУ-огнеупоров образование газов CO и CO₂ и их выделение в процессе эксплуатации в настоящее время становится проблемой для окружающей среды. По этой причине многие производители этого класса огнеупоров работают над уменьшением общего количества углерода в ПУ-изделиях без ущерба стойкости и ухудшения конечных характеристик и эксплуатационных свойств.

Подсчитано, что в мировой сталелитейной промышленности только процесс окисления углерода из состава огнеупорных изделий и масс ежегодно приводит к образованию более 2 млрд т CO₂.

В *Китае* недавно создан новый безуглеродный экологически чистый магниальный огнеупор на высокотемпературном композитном керамическом связующем. За счет армирования углеродными нанотрубками ПУ-огнеупоров китайские ученые из государственной главной лаборатории огнеупоров и металлургии Уханьского университета науки и технологии добились не только снижения выделений CO₂ из изделий,

но и значительного повышения термостойкости ПУ-огнеупоров [7].

Один из лидеров огнеупорного рынка компания *Krosaki Harima* (Япония) разработала новый огнеупорный материал марки *Fanon*, предназначенный для футеровки сталеплавильных агрегатов. Новый огнеупор имеет повышенную стойкость к воздействию высоких температур, его стойкость в 1,5–2 раза больше, чем у традиционных ПУ-материалов. Причем теплопроводность этого материала на 50–80 % меньше, чем у серийных ПУ-изделий. *Fanon* содержит углерод с особой наноструктурой, что позволяет не только значительно снизить общее содержание углерода в шихте, но и получить более высокие служебные показатели. Несмотря на то, что стоимость разработанного нового материала в настоящее время на 40–50 % выше стоимости традиционных изделий, компания *Krosaki Harima* активно продвигает эту продукцию на огнеупорном рынке Японии.

Компания «Сен-Гобен», которая является мировым лидером в производстве алюмосиликатных огнеупоров, активно участвует в защите климата. Компания поставила перед собой цель — достичь углеродной нейтральности к 2050 г. и снизить выбросы CO₂ к 2030 г. Для достижения этой цели компания учредила свой Карбоновый фонд, главной задачей которого является сокращение непромышленных выбросов. К этой работе привлечены все сотрудники, разработаны условия их мотивации. В настоящее время компания уже платит 50 евро сотрудникам, которые обеспечивают снижение выбросов CO₂. Фонд конвертирует часть снижения выбросов CO₂ в деньги и направляет их на финансирование проектов по сокращению углеродного следа. Эти проекты предлагаются и выбираются самими сотрудниками и касаются улучшения их рабочей среды. На создание Карбонового фонда до 2030 г. компания будет ежегодно выделять около 100 млн евро на целевые инвестиции и научные исследования, направленные на сокращение выбросов CO₂ на ее предприятиях.

Компания *Refratechnic* (Германия) является одним из лидеров в производстве огнеупоров для вращающихся печей для получения цемента. Вместо собственной электроэнергии, производимой из угольных ТЭЦ, для производства своих огнеупоров компания покупает электричество из Норвегии. Эта энергия производится исключительно экологически безопасным способом и относится к экологически чистой электроэнергии. В Норвегии «зеленая» электроэнергия производится местными заводами, на которых сертифицированные TÜV гидроэлектростанции вырабатывают возобновляемую энергию. Таким способом компания финансово поддерживает «зеленую» энергетику, что свиде-

тельствует о внимании к защите окружающего мира и человека.

Огнеупорные предприятия России в последние годы значительно улучшили работу в области экологии и снижения выбросов пыли и газообразных веществ.

На комбинате «Магнезит» уже практически отсутствуют нарушения по превышению ПДК выбросов пыли и газа. Несмотря на это Группа «Магнезит» планирует сократить выбросы еще на 20% в течение 5 лет и осуществляет замену электрофильтров на более современные и эффективные рукавные фильтры, позволяющие улавливать до 99,9 % выбросов.

При строительстве новых комплексов из котлованов извлекается более 1 млн т плодородного грунта, который начали распределять по поверхности отвалов ранее разработанных карьеров. В результате посадки травы, кустарников и деревьев (170 тыс. саженцев сосны, березы, ели, боярышника и облепихи) пейзаж в Саткинском районе Челябинской обл. преобразился. Группа «Магнезит» расходует на природоохранные мероприятия более 20 % всего объема инвестиций. Начиная с октября 2021 г. планируется рекультивировать отвалы с накопленными отходами породы и шламов и в течение 5–7 лет освободившиеся участки засадить лесом. Комбинат в рамках подписанного с властями Челябинской обл. соглашения намерен в течение пяти лет направить на экологию порядка 2 млрд руб. В рамках программы мероприятий планируется перевооружение туннельных печей, что в перспективе снизит на 20 % потребление газа и объем выбросов в атмосферу.

Боровичский комбинат огнеупоров в настоящее время выбрасывает более 3 тыс. т загрязняющих веществ. Для решения этой проблемы разработаны мероприятия по охране окружающей среды, в которые комбинат только на площадке ЦМП выделил в 2020 г. более 30 млн руб. Благодаря этим мерам прогнозируется снижение пыле- и газовыделения на 10 %.

В России в соответствии с Федеральным законом ФЗ 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» с января 2023 г. вводится отчетность предприятий, использующих или поставляющих продукцию с углеродным следом. Эти предприятия будут ежегодно предоставлять информацию о выбросах CO₂ на 1 т произведенной продукции.

Кроме того, правительство прорабатывает вопрос о введении в Налоговый кодекс РФ нового углеродного налога на организации, которые производят сами или ввозят в Россию импортные материалы и промышленную продукцию с наличием углерода. Поступления от этого углеродного налога будут направлены на решение экологических проблем. Это позволит уравнять цены на продукцию из Европы и из других

стран, в которых используются более дешевые технологии и выбросы парниковых газов регулируются меньше. Такая мера может коснуться китайских поставщиков ПУ-изделий (более 200 тыс. т) в РФ, в том числе отечественных предприятий, имеющих свои мощности по производству ПУ-огнеупоров в Китае.

В огнеупорной отрасли основным критерием снижения углеродного следа может стать внедрение технологий улавливания CO₂ в процессе обжига углеродного сырья (магнезита, доломита и др.). Улавливание выделений CO₂ из состава огнеупоров является задачей потребителей этой продукции. Имеется несколько современных технологий улавливания CO₂, применяемых в других отраслях:

- технология кальциево-карбонатного цикла (ККЦ), использующая в качестве сорбента для поглощения CO₂ оксид кальция, получаемый из дешевых известняков и доломитов. Технология применяется на угольных электростанциях с высокими выбросами CO₂;

- использование для улавливания CO₂ металлоорганических каркасных структур с большой внутренней поверхностью;

- использование специальных пленочных мембран, отфильтровывающих CO₂;

- применение отдельных видов морских водорослей, помещенных в специальные резервуары и способных поглощать CO₂ в процессе фотосинтеза. В этом процессе получается также биомасса, пригодная для топлива;

- методы адсорбционно-ректификационной очистки, каталитические методы очистки газовых выбросов (пиролизитный, озонокаталитический, жидкостно-контактный и радикально-каталитический), основанные на использовании промышленных каталитических нейтрализаторов.

К сожалению, большинство существующих технологий улавливания, хранения и утилизации CO₂ в их нынешнем виде слишком капиталоемкие и обременительные для огнеупорной отрасли. Высокая стоимость промышленных установок для удаления CO₂ и отсутствие универсальной инфраструктуры в настоящее время сдерживают их применение на огнеупорных предприятиях. Для снижения углеродного следа огнеупорным предприятиям рекомендуется следующее.

- увеличить производство неформованных материалов;

- снизить содержание графита в углеродсодержащих изделиях без потери эксплуатационных свойств;

- заменить органические связки на синтетические;

- применять альтернативные безуглеродные технологии с заменой периклазоуглеродистых изделий на массы и изделия на основе табулярного глинозема.

Следует отметить, что в настоящее время нет согласия между учеными большинства стран по вопросу влияния углеродного следа на формирование парникового эффекта. Существует мнение, что основная причина этого явления — извержение крупных вулканов, в котором выделяется значительно больше CO₂, чем его образуется в процессе всей деятельности человечества. Аналогичная ситуация имела место около 20 лет назад при появлении «озоновой дыры» над Австралией. Из-за этого явления по инициативе некоторых ведущих химических компаний США было остановлено производство фреонов, признанных причиной разрушения озонового слоя. Российское производство холодильного оборудования для выполнения принятых мировым сообществом обязательств было отброшено на десятки лет назад и имело большие финансовые потери. Сегодня в мире отсутствует согласие специалистов в области отнесения атомной энергии к источникам с низким углеродным следом, который в 25 раз меньше выбросов угольных ТЭЦ. Основная причина этого — лидерство российской корпорации «Росатом» в данной отрасли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проблема углеродного следа кроме важных для человечества процессов снижения выбросов CO₂ имеет разные политические и идеологические аспекты, направленные на усиление давления и введение санкций на экономику России и ее ведущих предприятий. Независимо от текущей ситуации государству и его предприятиям необходимо учитывать возможные варианты развития борьбы с парниковыми газами.

2. Предполагаемое введение углеродного налога затронет прежде всего российских производителей и экспортеров металлопроката.

3. Огнеупорная отрасль имеет ограниченный экспорт углеродсодержащих изделий и масс и не будет подвергаться внешнему давлению со стороны других стран по углеродному налогу. Возможны дополнительные требования от внутренних потребителей огнеупоров.

4. В огнеупорной отрасли снижение выделений CO₂ и его утилизация требует значительных инвестиций и вызовет удорожание огнеупорной продукции.

5. Основные меры по снижению углеродного следа будут связаны с улавливанием CO₂ при обжиге магнезита, доломита и других видов сырья, а также в процессе сгорания топлива при обжиге готовых изделий.

Библиографический список

1. **Сергей Неделин.** Углеродный налог — ближайшая перспектива. http://www.metalsmining.ru/ru/page/art1_carbonprint.html.

2. **Дарья Белова.** <https://rueconomics.ru/521396-uglerodnyi-nalog-es-ne-risknet-pereseekat-opasnuyu-chertu-i-pugat-eksporterov-iz-rossii>.

3. **Андрей Конопляник.** Борьба за сохранение климата превращается в инструмент конкурентной борьбы / А. Конопляник // Газета «Ведомости» 03.06.21.

4. **Сергей Маржецкий.** <https://topcor.ru/19896-kak-razorvat-karbonovuju-udavku-na-rossijskoj-jekonomike.html>.

5. https://zinref.ru/000_uchebniki/04600_raznie_7/756_RF_nac_doklad_kadastre_2017_chast_1/009.htm.

6. **Кононов, В. А.** Графит: рынок, добыча, свойства, применение / В. А. Кононов // Новые огнеупоры. — 2021. — № 3. — С. 3–10.

7. **Поморцев, С. А.** Разработка технологии модифицированных периклазоуглеродистых огнеупоров для сталеразливочных ковшей : дис. ...канд. техн. наук / Сергей Анатольевич Поморцев. — Екатеринбург, 2017.

Получено 14.10.21

© В. А. Кононов, 2022 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Петербургская техническая ярмарка (ПТЯ) 2022

26–28 апреля 2022 г.

Санкт-Петербург, КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»



В 2022 году в рамках ПТЯ традиционно будет организована актуальная для современной промышленности деловая программа, которая включает Санкт-Петербургский промышленный конгресс, на котором специалисты обсудят новые проекты, технологии, существующие проблемы и перспективы развития отрасли, а также международный конкурс «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года», призванный стимулировать деятельность предприятий в области инновационных технологий.

Разделы выставки:

- Металлургия, литейное дело
- Крепеж, метизы, инструмент
- Обработка металлов, машиностроение
- Пластмассы, полимеры, композиты, РТИ
- Охрана труда и средства индивидуальной защиты

ptfair.ru