

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ВНЕДРЕНИЯ ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МЕТАЛЛУРГИИ РОССИИ

ГАЛИНГЕР Александр Александрович, gall2007nvdv@gmail.com, младший научный сотрудник, Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Москва, Россия
ORCID: 0000-0001-9561-9065, Scopus Author ID: 57216334965

В статье изучен вопрос необходимого уровня государственной поддержки водородных технологий в металлургии за счет углеродного сбора в России. Сопоставлены различные комбинации производственных технологий выплавки стали: в конвертерных печах и электрических печах с различными вариантами процесса прямого восстановления железа. Оценено, что граничная минимальная величина углеродного сбора, при которой чистая приведенная стоимость водородных технологий в металлургии сравнивается со стоимостью традиционных технологий, составляет около 4500 руб./тCO₂-экв. При такой стоимости углеродных выбросов дополнительная налоговая нагрузка на отрасль составит порядка 640 млрд руб. в год при отсутствии структурно-технологических изменений в металлургическом производстве.

Ключевые слова: водород, углекислый газ, металлургия, электролиз, декарбонизация, углеродный сбор, технологии, налоги, государственная поддержка

DOI: 10.47711/2076-3182-2023-4-165-181

Введение. В 2021 г. принята Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации¹. Важной составляющей этого документа являлись оценки мирового потребления водорода (H₂), а также экспортного потенциала России (прежде всего в страны Европейского союза). Мировой спрос в 2050 г. оценивался в 40–170 млн т H₂; экспорт из России прогнозировался на уровне 0,2 млн т H₂ в 2024 г., 2–12 млн т H₂ в 2035 г.,

¹ Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 5 августа 2021 г. № 2162-р.

15–50 млн т H_2 в 2050 г., в зависимости от оптимистичности рассматриваемого сценария. Согласно заявлениям бывшего спецпредставителя президента по связям с международными организациями А. Чубайса, для достижения целей устойчивого развития объемы продаж водорода в будущем могли бы достигать 50 млрд долл., а продажи с учетом сопутствующей индустрии – 100 млрд долл.² При этом объемы мирового потребления водорода прогнозировались крупными экспертно-аналитическими группами в 115–140 млн т H_2 уже в 2030 г., и до 616–660 млн т H_2 в 2050 г.^{3,4,5}

Однако масштабные внешнеэкономические ограничения, вводимые развитыми странами против России с 2022 г., минимизировали значимость экспортной составляющей в вопросах развития водородного сектора России. В сложившихся условиях водородная концепция была переориентирована на внутренний рынок⁶, в связи с чем становятся актуальными вопросы необходимых стимулов для осуществления качественного скачка в развитии национальной водородной промышленности.

Говоря о международной практике, в настоящее время наиболее вероятным видится применение водорода на транспорте, в некоторых секторах промышленности и при энергообеспечении помещений либо промышленных объектов⁷ [1]. В транспорте в первую очередь рассматривается грузовой дорожный транспорт, а затем – личный дорожный транспорт. Это связано с тем, что для дорожного транспорта технологии находятся в наибольшей степени готовности к экономически обоснованному применению по сравнению с прочими видами транспорта. А приоритет в развитии грузовых видов транспорта перед легковыми объясняется тем, что необходимым элементом водородного автомобиля является система хранения водорода, которая

² РБК. Чубайс назвал два главных процесса в экономике в ближайшие десять лет. URL: <https://www.rbc.ru/economics/08/07/2021/60e62d829a7947bb0ca623da> (дата обращения 08.08.2023)

³ IEA. *Global Hydrogen Review 2022*.

⁴ IRENA. *Global hydrogen trade*. URL: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen/Global-hydrogen-trade> (дата обращения 08.08.2023)

⁵ Hydrogen Council, McKinsey & Company. *Hydrogen for Net-Zero*. 2021

⁶ Пресс-служба правительства России. URL: <http://government.ru/news/47555/> (дата обращения 08.08.2023)

⁷ Hydrogen Council, Ludwig-BölkowSystemtechnik GmbH, McKinsey & Company. *Hydrogen decarbonization pathways. A life-cycle assessment*. 2021.

обладает внушительными минимальными параметрами (массовыми и габаритными), однако эти параметры медленно растут с ростом необходимой емкости хранения топлива. Они растут значительно медленнее, чем у автомобилей с литий-ионными батареями за счет большей плотности энергии, почти в 9-10 раз, сжатого до давления в 690 атмосфер (700 бар) водорода.

В вопросах энергообеспечения применение водорода обычно рассматривается в двух аспектах: обеспечение отопления и генерация электроэнергии. Применение водорода на эти цели преследует в первую очередь цели снижения выбросов. Примечательно, что, поскольку генерация электроэнергии рассматривается обычно на топливных ячейках, то отопление в таком случае будет естественным образом сопутствовать данной функции. Это обуславливается химическими аспектами протекания процесса.

Секторами промышленности, которые в первую очередь рассматриваются как подходящие для применения водорода, являются химическая (производство аммиака и метанола) и сталелитейная отрасли. Это связано с некоторыми факторами. Во-первых, эти отрасли уже являются крупными мировыми потребителями водорода в чистом виде либо в виде смеси с другими газами: производство аммиака – 34 млн т H_2 в 2021 г, производство метанола – 15 млн т H_2 , сталелитейная промышленность – 5 млн т H_2 . Во-вторых, не ожидается их значимого сокращения (а в некоторых сценариях, наоборот – значительный рост) в процессе мирового перехода на низкоэмиссионные технологии.

Активно разрабатываемые в последние несколько лет водородные технологии обычно относятся к «зелёным», то есть не образующим парниковых выбросов в процессе своей работы. В настоящее время ведущими экспертно-аналитическими группами признается необходимость государственной поддержки развития «зелёных» технологий⁸, поскольку их текущий уровень развития не позволяет быть экономически эффективными во многих случаях. Существуют разнообразные методы поддержки «зелёных» технологий, например их прямое

⁸ WEO 2022. International Energy Agency. 2022.

субсидирование, запрет на «не зелёные» аналоги, углеродный сбор (в форме административного налога либо системы торговли выбросами) [2, 3, 4] на производимую в стране либо импортируемую продукцию [5]. Так, в США на федеральном уровне (у отдельных штатов тоже существуют свои меры поддержки) отдается предпочтение субсидированию низкоэмиссионных технологий⁹ через налоговые вычеты либо обеспечение сниженной ставки по кредиту на приобретение «зелёных» продуктов. В ЕС широко применяется единая система торговли выбросами, есть установление определённых технологических стандартов потребляемой продукции (например, бензины класса Евро-4, Евро-5), прорабатывается введение с 2025 г. трансграничного налога на эмиссию импортируемой продукции, запрет на продажу автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) с 2035 г., а также приобретение «зелёной» продукции (например, электроэнергия от ВИЭ-источников) по фиксированной рыночной цене. В Китае до 2020 г. орабатывались пилотные региональные рынки углеродных выбросов. После этого была создана единая Китайская национальная система торговли выбросами. Среди международных организаций в данном вопросе можно выделить Международную морскую организацию (ИМО), которая запретила с 2020 г. использование высокосернистых топлив (с содержанием сернистых соединений более 0,5% в судовом топливе). Это способствовало широкому переходу среди судов на использование природного газа, что снизило эмиссию парниковых газов от морского судоходства.

В области водорода ЕС обеспечивает развитие водородных технологий через проект «IPCEI Hy2Use», который предусматривает поддержку в развитии водородных проектов на сумму в 5,2 млрд евро в 13 странах Евросоюза¹⁰. Помимо этого, с 2021 г. идет планомерная работа по юридическому включению (с получением соответствующих льгот) водорода, произведенного с использованием возобновляемых источников энергии, в список «зелёных» технологий.

⁹ *The White House, The Inflation Reduction Act. 2022.*

¹⁰ *European Commission. State Aid: Commission approves up to €5.2 billion of public support by thirteen Member States for the second Important Project of Common European Interest in the hydrogen value chain. 2022.*

Стоит отметить, что необходимость государственной поддержки «зелёных» технологий в черной металлургии имеет свое обоснование и в научной литературе [5], при этом цена продукции в таком случае может увеличиться в диапазоне от 5-10% [6] до 33% [7]. Уровень компенсации падения ценовой конкурентоспособности выплавляемой «зелёной» стали в ЕС оценивается в 60 евро / тСО₂-экв. Для случая выплавки стали традиционными технологиями, но с одновременным улавливанием сопутствующих выбросов углекислого газа потребуется уровень поддержки уже в 100 евро / тСО₂-экв. В настоящее время (на основе расчетов по 2020 г. [8]) налог на углеродные выбросы в 24,6 евро / тСО₂-экв., в комбинации с ценой электроэнергии в 54,6 евро / МВт-ч и ценой природного газа в 18,5 евро / МВт-ч приводит к росту себестоимости выплавки стали кислородно-конверторным способом на 40 евро / т стали до 500 евро / т стали. При этом электровыплавка на природном газе дорожает менее чем на 10 евро / т стали до 490 евро / т стали, что все равно остается значительно дешевле электровыплавки на водороде в 660 евро / т стали. Такая разница в надбавках к себестоимости выплавляемой стали объясняется тем, что в указанной работе процесс подготовки агломерата считался частью только конвертерной выплавки стали. Такой подход обоснован для ситуации, когда в электропечах в качестве железорудного сырья используется металлический лом, однако, вместе со снижением выбросов это приводит и к снижению качества выплавляемой стали.

Развитие водородного сектора в России возможно, например, через госпрограммы, направляющие необходимые ресурсы в сектор, или через установление предельных значений удельных выбросов. В рамках проведенного исследования рассмотрен инструмент создания стоимости для выбросов парниковых газов, а именно углеродный сбор. Суть сбора заключается в том, чтобы предприятия платили за каждую тонну произведенных в процессе хозяйственной деятельности парниковых газов. Как и другие инструменты, углеродный сбор имеет свои особенности применения. При его повсеместном внедрении произойдет рост фискальной нагрузки на предприятия, что негативно скажется на динамике экономического развития России, может

привести к снижению конкурентоспособности экономики страны, ускорению темпов инфляции, возможно снижение инвестиционной активности бизнеса [9].

В рамках исследования автор ставит перед собой задачу нахождения необходимой величины углеродного сбора для достижения экономического паритета применения традиционных и новых водородных технологий в металлургии. В рамках поставленной задачи введение углеродного сбора рассматривается исключительно в пределах металлургической отрасли.

Такая постановка задачи продиктована ещё и тем обстоятельством, что в 2016 г. в рамках международной борьбы с климатическими изменениями Россией было подписано Парижское соглашение по ограничению выбросов парниковых газов (ратифицировано в 2019 г.). Для выполнения взятых обязательств была принята Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. В ней в разделе IV «Мероприятия по реализации Стратегии» предусматривается повышение энергетической и ресурсной эффективности металлургической промышленности, увеличение доли производства электростали, доли производства железа прямого восстановления, замена природного газа на водород (требует исследования и создания необходимой инфраструктуры). Значимость снижения эмиссии CO₂ в металлургии обосновывается тем, что на нее в России пришлось в 2021 г. 140 млн т CO₂-экв. или 6% всех производимых страной выбросов (это соответствует среднемировой доле металлургии в общем объеме выбросов парниковых газов в 6-7% [10]). При этом уже есть примеры работы по снижению выбросов парниковых газов при производстве стали¹¹ [11]. Отдельное место в вопросе декарбонизации занимают электропечи, работающие на металлоломе, однако рост их использования в перспективе может быть ограничен дефицитом вторичного сырья. Помимо этого, некоторыми авторами рассматривается такой перспективный метод производства стали, как электролиз железной руды с использованием

¹¹ *Green Steel: the road to net zero. Reuters Events. URL: https://www.lindehydrogen.com/-/media/corporate/linde-hydrogen/files/brochures_downloads/reuters-linde-green-steel-whitepaper-vfinal.pdf?la=en (дата обращения 08.08.2023)*

низкотемпературного (110 °С) щелочного раствора [12], однако его внедрение ожидается не ранее 2040 г. в странах Евросоюза.

Сейчас в России и в мире существуют две основные технологии выплавки стали: в конвертерных печах и в электрических печах. В России такими технологиями выплавляют до 98% стали, согласно данным World Steel Organization¹². Всего в России выплавлялось около 70 млн. т стали в год в течение последнего десятилетия, на конвертерную выплавку приходилось 63-67% выплавляемой стали, а на выплавку в электропечах – 27-34%. При этом доля конвертерных печей колеблется в указанном диапазоне, в то время как доля электровыплавки выросла на 7 п.п. Это связано с процессами замещения мартеновских печей в структуре производства российской стали.

Первичные этапы подготовки железорудного сырья (ЖРС) в упомянутых выше технологических процессах схожи. Далее в случае конвертерной выплавки идет выплавка чугуна в доменной печи, а потом выплавка стали из чугуна в кислородном конвертере.

В случае же использования электропечей вторым этапом происходит металлизация ЖРС с помощью процесса прямого восстановления железа (DRI, direct reduced iron – в иностранной литературе), а из металлизированного ЖРС в электропечах уже выплавляют сталь.

В контексте данной работы особое значение имеет процесс прямого восстановления железа. В нем обычно используется природный газ в качестве сырья для синтез-газа (смеси из остатков природного газа, водяного пара, водорода, угарного газа, углекислого газа), который и восстанавливает железо. Углекислый газ (сам по себе) и угарный газ (за счет дальнейшей реакции с кислородом) обеспечивают парниковые выбросы. Однако в процессе прямого восстановления железа возможна замена использования синтез-газа на водород [12]. Это позволит снизить эмиссию от производства стали.

Методика. При проведении оценок будут рассматриваться разные комбинации производства стали на основе конвертерной выплавки, электровыплавки на природном газе и электровыплавки

¹² World Steel Association. STEEL STATISTICAL YEARBOOK 2019. Concise version. 2019.

на водороде. В табл. 1 приведены оценки значимых для данной работы технико-экономических параметров описанных технологий.

Таблица 1

Технико-экономические параметры технологий выплавки стали

Показатель	Единица измерения	Величина
Конвертерная выплавка		
Инвестиции	руб. / (т стали / год)	4000
Потребление газообразных топлив	т у.т. / т стали	0,007
Потребление твердых топлив	т у.т. / т стали	0,233
Потребление жидких топлив	т у.т. / т стали	0,019
Потребление электричества	т у.т. / т стали	0,148
Потребление тепла	т у.т. / т стали	0,183
Выбросы	т CO ₂ -эquiv / т стали	1,900
Электровыплавка (газ)		
Инвестиции	руб. / (т стали / год)	6400
Потребление газообразных топлив	т у.т. / т стали	0,275
Потребление твердых топлив	т у.т. / т стали	0,089
Потребление жидких топлив	т у.т. / т стали	0,021
Потребление электричества	т у.т. / т стали	0,491
Потребление тепла	т у.т. / т стали	0,111
Выбросы	т CO ₂ -эquiv / т стали	1,100
Электровыплавка (водород)		
Инвестиции	руб. / (т стали / год)	5420,5
Потребление газообразных топлив	т у.т. / т стали	0,000
Потребление твердых топлив	т у.т. / т стали	0,089
Потребление жидких топлив	т у.т. / т стали	0,021
Потребление электричества	т у.т. / т стали	0,491
Потребление тепла	т у.т. / т стали	0,111
Потребление водорода	т у.т. / т стали	0,320
Выбросы	т CO ₂ -эquiv / т стали	0,700

Источник: оценки ИНП РАН на основе [13].

Обеспечивать спрос на водород в металлургии предполагается за счет внутреннего производства. Существует три основных технологии производства водорода: 1) паровая конверсия метана (около 73% мирового производства водорода), 2) газификация угля (до 23% мирового производства водорода) и 3) электролиз воды (4% мирового производства водорода). При паровой конверсии метана водород получается путем разложения природного газа при высоких температурах в присутствии водяного пара. Побочным продуктом данного процесса являются выбросы углекислого и угарного газов (учтено при расчётах). При газификации угля водород получается при взаимодействии паров воды и собственно угля, побочные продукты те же, что при паровой конверсии метана. При электролизе водород получается при

пропускании электрического тока через специально подготовленную воду в присутствии катализаторов. Выбросов парниковых газов при этом не происходит. На этапе разработки находятся технологии пиролиза метана, которые позволили бы разлагать его на водород и углерод без образования парниковых выбросов, однако данные технологии ещё не готовы к внедрению в промышленность.

В рамках работы интерес представляют технологии паровой конверсии метана (как широко используемой в существующих и разрабатываемых проектах) и электролиза воды (как активно разрабатываемой в России). В табл. 2 показаны сравнительные технико-экономические параметры технологий производства водорода.

Таблица 2

Технико-экономические параметры технологий производства водорода

Показатель	Единица измерения	Величина
Паровая конверсия метана		
Инвестиции	тыс. руб. / (т H ₂ / год)	161,5
Потребление газообразных топлив	т у. т. / (т H ₂)	6,58
Потребление электричества	т у.т. / (т H ₂)	0,03
Потребление тепла	т у.т. / (т H ₂)	0,38
Электролиз		
Инвестиции	тыс. руб. / (т H ₂ / год)	304
Потребление электричества	т у.т. / (т H ₂)	5,97

Источник: оценки ИИП РАН на основе [14], [15].

Сейчас технология электролизеров является развивающейся в плане улучшения своих показателей эффективности. Поэтому в качестве технико-экономических параметров были взяты данные не для щелочных электролизеров, которые являются давно апробированной (и уже не самой эффективной) технологией производства водорода из воды, а для щелочных [16, 17]. Щелочные электролизеры считаются наиболее подходящими для работы в режиме непрерывного производства сталелитейного завода. Разница в эффективности достигает порядка 14%.

Для определения необходимой величины углеродного сбора использовалась следующая последовательность действий. Рассматривались два производства с равными объемами выплавки

стали (1 т в год). В первом производстве для выплавки использовались технология конвертерных печей и технология электрических печей (на природном газе) в соотношении 1 к 1. Во втором производстве, использовались для выплавки технология конвертерных печей, технология электрических печей (на природном газе) и технология электрических печей (на электролизном водороде) в соотношении 4 к 5 к 1 соответственно (табл. 3).

Таблица 3

Рассматриваемые комбинации технологий

<p>Производство 1 Конвертерная выплавка, 50% Электровыплавка (газ), 50%</p>	<p>Производство 2 Конвертерная выплавка, 40% Электровыплавка (газ), 50% Электровыплавка (водород), 10%</p>
---	---

Источник: составлено автором.

Таким образом, замещение конвертерной выплавки на выплавку в электропечах с использованием водорода (при переходе от производства 1 к производству 2) позволило бы снизить сопутствующие выбросы парниковых газов, что позволит избежать дополнительных издержек в виде углеродного сбора (см. рис. 1).

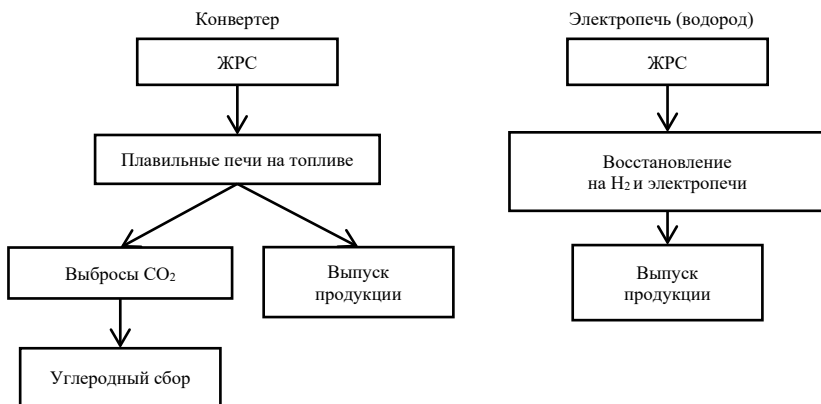


Рис. 1. Различия между замещаемыми традиционными и замещающими «зелёными» технологиями выплавки стали

Источник: составлено автором.

Далее для обоих производств рассчитывалось значение параметра NPV (чистой приведённой стоимости) на период до 20 лет (срок эксплуатации установок по производству водорода) [18, 19]. Доходы формировались реализацией 1 т стали по цене 53,3 тыс. руб. (использована средняя цена производителей на прокат листовой горячекатаной стальной, без дополнительной обработки за январь-июнь 2023 г.¹³). Расходы складывались из стартовых инвестиций, расходов на энергетические ресурсы, необходимые для производства (см. табл. 4), и углеродного сбора за производимые выбросы. Для числовых значений таблицы брались средние цены производителей за январь-июнь 2023 г. на масла индустриальные, кокс и полукокс из каменного угля, газ горючий естественный, электроэнергию, отпущенную промышленным потребителям по регулируемым тарифам, и энергию тепловую, отпущенную котельными.

Региональная дифференциация цен не бралась в рассмотрение, поскольку это выходило за рамки данной работы, однако она может вносить кратные различия в цену конечной продукции [20]. Строго говоря, электричество – не единственный расходный ресурс при производстве водорода, однако именно его стоимость (по сравнению с прочими расходными материалами) является значимым фактором формирования цены производимой продукции [14]. Прочие (не связанные с инвестициями и закупкой сырья и энергии) затраты производств полагались равными.

Таблица 4

Цены на энергоресурсы

Показатель	Единица измерения	Величина
Газообразные топлива	руб./ тыс. м ³	3335
Твердые топлива	руб./ т	18449
Жидкие топлива	руб./ т	79033
Электричество	руб./ кВт-ч	4,5
Тепло	руб./ Гкал	2139

Источник: оценки ИНП РАН на основе данных Росстата.

¹³ Росстат.

Для электровыплавки с прямым восстановлением железа на водороде учитывалось, что в отличие от процесса прямого восстановления железа на природном газе там нет оборудования, превращающего природный газ в синтез-газ. Это дало снижение инвестиций в данном случае на величину, эквивалентную инвестициям в установку паровой конверсии метана, так как в ней также происходит преобразование природного газа в синтез-газ. Отличие состоит в том, что дальше водород сепарируется от остальной смеси газов. Величина углеродного сбора определялась через равенство NPV для сопоставляемых производств.

Результаты. Равенство показателей NPV производств 1 и 2 было достигнуто при величине углеродного сбора в 4500 руб. / т CO₂-экв или 47,7 долл. / т CO₂-экв (по курсу ЦБ РФ на 25.08.2023). Показатели производств приведены в табл. 5. Данная величина углеродного сбора была бы сопоставима с величиной углеродного сбора в ЕС (на площадке торговли квотами на выбросы) в 2021 г.¹⁴. Во многом она объясняется сравнительно высокой стоимостью инвестиций в «зелёные» технологии, и ценой электроэнергии, которая должна заместить топлива (при смене технологий) сопоставимым количеством энергии в энергетическом эквиваленте, при сравнительно более высокой цене этой энергии.

Таким образом, можно сделать вывод, что развитие низкоэмиссионных технологий в России требует существенной государственной поддержки. Существующий уровень эмиссии парниковых газов ляжет на российские металлургические предприятия дополнительной нагрузкой порядка 640 млрд. руб. (при объеме выбросов отрасли порядка 140 млн т CO₂-экв.), что сопоставимо с 3,4% доходов федерального бюджета России в 2020 г. или 18% от объёма отгруженных товаров металлургического производства (за исключением основных драгоценных металлов и прочих цветных металлов, ядерного топлива) в стоимостном выражении в действовавших ценах. Потенциал снижения выбросов при использовании низкоэмиссионных технологий составит примерно 17%.

¹⁴ Carbon Price Tracker. URL: <https://ember-climate.org/data/data-tools/carbon-price-viewer/> (дата обращения 08.08.2023).

Параметры модели и результаты расчетов

Показатель	Единица измерения	Величина
Производство 1		
Инвестиции	тыс. руб.	5,2
Доход	тыс. руб.	53,3
Расход	тыс. руб.	25,6
Потребление энергоресурсов	тыс. руб.	18,0
Углеродный сбор	тыс. руб.	7,6
Ставка дисконтирования	%	7,5
Срок	лет	20,0
NPV	тыс. руб.	269,0
Выбросы	т CO ₂ -экв / т стали	1,7
Производство 2		
Инвестиции	тыс. руб.	5,44
Доход	тыс. руб.	53,3
Расход	тыс. руб.	25,2
Потребление энергоресурсов	тыс. руб.	18,9
Углеродный сбор	тыс. руб.	6,3
Ставка дисконтирования	%	7,5
Срок	лет	20,0
NPV	тыс. руб.	269,0
Выбросы	тыс. т CO ₂ -экв / т стали	1,4

Источник: оценки ИИП РАН.

Решения задачи снижения затрат на электроэнергию в процессе электролиза в настоящее время концентрируются на поиске локальных источников электроэнергии с её низкой стоимостью. Примером подобного источника в России является Кольская АЭС. В её случае есть запертые неиспользуемые мощности за счет изолированности энергосистемы Кольского полуострова от остальной страны. В связи с этим уже рассматривался вопрос создания атомно-металлургического комплекса в Мурманской области [21] и делался вывод, что реализация подобного проекта потребует предварительного решения нескольких технических и организационных задач. В настоящее время проводятся пилотные работы по использованию новейших электролизёров для обеспечения потребностей самой электростанции¹⁵.

Следует отметить, что для существующего высокого уровня капиталоемкости электролизного производства водорода основной потенциал снижения – расширение спроса на водород,

¹⁵ *Вестник ГТЭК Мурманск*. URL: <https://murman.tv/news-n-7534--na-kolskoj-aes-zapustili-novuyu-ustanovku-%E2%80%93-elektrolizer-dlya-proizvodstva-vodoroda>

что в рамках металлургии возможно при производстве цветных металлов. В цветной металлургии представляет интерес возможность пластификации некоторых сплавов титана (например, никелида титана) водородом [22, 23] и повышения этим газом прочности некоторых алюминиевых сплавов [23]. Это, как минимум, будет способствовать снижению выбросов через замещение производства водорода методом паровой конверсии метана. Определённый потенциал использования «зелёного» водорода присутствует в нефтепереработке (спрос 40 млн. т H_2 в 2021 г.), однако там порядка 80% потребляемого водорода – побочный продукт каталитического риформинга бензина [24]. В дополнение к этому нужно отметить, что внедрение низкоэмиссионных технологий приведёт к сокращению спроса на нефтепродукты. А это, в свою очередь, вызовет сокращение спроса на водород со стороны нефтеперерабатывающих предприятий. В случае производства аммиака стоимость сырья (природного газа) достигает в нём 70-80%, что при замене природного газа на водород потребует значительно более высокого уровня государственной поддержки, чем в металлургии [25], чтобы достигнуть схожих потенциалов снижения выбросов. Для производства метанола существующие ограничения упираются в то, что половина его мирового производства расположена в Китае, где водород для него получается с использованием угля. Это значительно удешевляет его производство, а потому, как и в случае с аммиаком, требуется значительная поддержка.

Заключение. На фоне остальных методов поддержки низкоэмиссионных технологий углеродный сбор выделяется минимумом затрат со стороны государства (на администрирование этого налога), при этом основные издержки будут переложены на представителей бизнеса (и потребителей, в конечном счёте). Введение углеродного сбора в металлургической отрасли приведёт к дополнительной нагрузке на предприятия отрасли в размере 640 млрд. руб. или 18% выручки, если не будет никаких действий со стороны металлургов по изменению структуры производства.

Для изменения структуры производства потребовалось бы 38 млрд. руб. (при объёмах выплавки 2020 г.), что составляет около 14,5% от величины капитальных затрат чёрной металлургии в 2020 г. (определялись через разность капитальных

затрат производства металлургического и производства основных драгоценных металлов и прочих цветных металлов, производство ядерного топлива по статистической форме П-2). При этом необходимо помнить, что даже при изменении структуры производства чёрной металлургии, в цене выплавляемой стали будет присутствовать надбавка за счёт оставшихся выбросов.

В то же время, как видно из сопоставления комбинированных производств, в случае введения углеродного сбора потенциал снижения выбросов составит 17%, что однозначно будет способствовать достижению заявленных целей Парижского соглашения.

В методике, использованной для выполнения описанной работы, показано, что размер углеродного сбора зависит от некоторого набора параметров. В металлургии в настоящее время ключевым фактором, определяющим величину углеродного сбора, является цена на электроэнергию. Возможность снижения необходимого уровня углеродного сбора заключается в доступе к сравнительно дешёвой электроэнергии в ряде регионов России.

Требуется дальнейшего исследования вопрос того, в каких перспективных отраслях применения водорода введение углеродного сбора будет более либо менее эффективным, с точки зрения потенциала снижения эмиссии парниковых газов.

Важно помнить, что углеродный сбор – далеко не единственный способ стимулирования развития «зелёных» технологий, а потому возникает вопрос сопоставления различных мер поддержки (и их эффективности) низкоэмиссионных технологий в металлургии.

Список литературы

1. Ned Stetson. *Hydrogen Technologies Overview*. 2021.
2. Макаров И.А., Музыченко Е.Е. О возможностях запуска регионального пилотного проекта по развитию низкоуглеродной экономики в Республике Татарстан // *Георесурсы*. 2021. Т. 23. № 3. С. 24-31. DOI 10.18599/grs.2021.3.4. – EDN FFXWHD.
3. Карпова О.П., Обувалов В.Д. Зеленое финансирование как элемент защиты окружающей среды // *Бенефициар*. 2020. № 71. С. 12-16. – EDN RMEKTN
4. Яковлева Е.Н. Финансовое обеспечение управления климатической безопасностью // *Вестник Удмуртского университета. Серия Экономика и право*. 2021. Т. 31. № 6. С. 1032-1040. DOI 10.35634/2412-9593-2021-31-6-1032-1040. – EDN ZQMPRM.
5. Glushchenko A. M. *Decarbonization of the Steel Industry: the Role of State Economic Policy. Problemy ekonomiki (Khar'kov)*. 2020. No. 1(43). Pp. 340-347. DOI 10.32983/2222-0712-2020-1-340-347. – EDN CSNSWM
6. Батырев И.А. Мировой тренд декарбонизации металлургии и ее «озеленение» в России. // *Теория права и международных отношений*. 2021. Т. 1. № 7(19). С. 268-273. – EDN XFKGSN.

7. Kurrer Ch. *The potential of hydrogen for decarbonising steel production*. European Parliamentary Research Service. Scientific Foresight Unit (STOA) PE 641.552 – December 2020.
8. Conde A.S., Rechberger K., Spanlang A., Wolfmeir H., Harris Ch. *Decarbonization of the steel industry. A techno-economic analysis*. *Matériaux & Techniques*. Volume 109. № 305. 2021.
9. Гордиенко М.С. Углеродный сбор в системе неналоговых платежей Российской Федерации // *Сибирская финансовая школа*. 2020. № 1(137). С. 41-47. – EDN FBJENI.
10. Башмаков И.А. Масштаб необходимых усилий по декарбонизации промышленности // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т. 8. № 2. С. 151-174. DOI 10.21513/2410-8758-2022-2-151-174. – EDN ZVDHXM.
11. Седин В.А., Иванчиков Е.О., Калий В.А., Мартинчук А.Ю. Энергетическая установка на базе нагревательной печи прокатного стана с опцией производства водорода // *Энергетика*. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2022. Т. 65. № 2. С. 127-142. DOI 10.21122/1029-7448-2022-65-2-127-142. – EDN CVQTGG.
12. Harpprecht C., Naegler T., Steubing B., Tukker A., Simon S. *Decarbonization scenarios for the iron and steel industry in context of a sectoral carbon budget: Germany as a case study*. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 380. Part. 2. December 2022.
13. Li Xi., Sun W., Zhao L., Cai Ji. *Material metabolism and environmental emissions of BF-BOF and EAF steel production routes*. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2018. vol. 39. № 1. Pp. 50–58. DOI:10.1080/08827508.2017.1324440.
14. Bhaskar A., Assadi M., Somehsaraei H.N. *Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen*. *Energies*. 2020. *Energies* 2020. 13(3). 758. URL: <https://doi.org/10.3390/en13030758>
15. *Enabling a Low-Carbon Economy via Hydrogen and CCS*. Trondheim Conference on CO₂ Capture? Transport and Storage. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/355128876_ELEGANCY_-_Enabling_a_low-carbon_economy_via_hydrogen_and_CCS (дата обращения 08.08.2023)
16. Maksic A.D., Miulovic S.M., Nikolic V.M., Perovic I.M., Kaninski M.P.M. *Energy consumption of the electrolytic hydrogen production using Ni–W based activators—Part I*. University of Belgrade, Vinca Institute. Department of Physical Chemistry. 11001 Belgrade. POB 522. Serbia.
17. Bepalko S., Mizeraczyk J. *Overview of the Hydrogen Production by Plasma-Driven Solution Electrolysis*. *Energies*. 2022. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/20/7508> (дата обращения 08.08.2023).
18. Schreiber A., Peschel A., Hentschel B., Zapp P. *Life Cycle Assessment of Power-to-Syngas: Comparing High Temperature Co-Electrolysis and Steam Methane Reforming*. *Frontiers in Energy Research*. 2020. vol. 8. DOI: 10.3389/fenrg.2020.533850.
19. Gerloff N. *Comparative Life-Cycle-Assessment analysis of three major water electrolysis technologies while applying various energy scenarios for a greener hydrogen production*. *Journal of Energy Storage*. 2021. vol. 43. DOI: 10.1016/j.est.2021.102759
20. Christensen A. *Assessment of Hydrogen Production Costs from Electrolysis: United States and Europe*. The International Council of Clean Transportation. Consultant Report June 4.2020.
21. Кудрин Б.И., Кошарная Ю.В. *История решений по созданию ядерно-металлургического комплекса на базе Кольской атомной электростанции* // *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. 2017. Т. 20. № 4. С. 755-760. – EDN YLQGSF.
22. Абдульменова Е.В., Кульков С.Н. *Водород и его влияние на измельчение порошка никелида титана* // *Обработка металлов (технология, оборудование инструменты)*. 2021. Т. 23. № 3. С. 100-111. DOI 10.17212/1994-6309-2021-23.3-100-111. – EDN TALFXV.
23. Гольцова М.В. *Водородные технологии в литье и металлургии; настоящее и будущее (обзор)* // *Литье и металлургия*. 2018. № 4(93). С. 145-154. DOI 10.21122/1683-6065-2018-4-145-154. – EDN POLWQV.
24. Письмен М.К. *Производство водорода в нефтеперерабатывающей промышленности*. М. «Химия». 1976. 208 с.
25. Клевке В.А., Левин И.А., Петряева Д.А., Тошчев А.Ф. *Жидкие азотные удобрения*. М. «Химия». 1973. 141 с.

Для цитирования: *Галингер А.А.* Оценка условий внедрения водородных технологий в металлургии России // Научные труды. Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2023. № 4. С. 165-181.
DOI: 10.47711/2076-3182-2023-4-165-181.

Summary

ASSESSMENT OF CONDITIONS FOR INTRODUCTION OF HYDROGEN TECHNOLOGIES IN METALLURGY IN RUSSIA

GALINGER Alexander A., gall2007nvdv@gmail.com, Junior Researcher, Institute of Economic Forecasting RAS, Moscow, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-9561-9065>, Scopus Author ID: 57216334965

Abstract. The article studies the issue of the necessary level of state support of hydrogen technologies in metallurgy at the expense of carbon fee in Russia. Different combinations of steelmaking production technologies: in converter furnaces and electric furnaces with different variants of direct iron reduction process are compared. It is estimated that the boundary minimum value of carbon charge, at which the net present value of hydrogen technologies in metallurgy will be equal to the cost of conventional technologies, is about 4500 rubles/tCO₂-eq. At such a cost of carbon emissions, the additional tax burden on the industry will be about 640 bln rubles per year in the absence of structural and technological changes in metallurgical production.

Keywords: hydrogen, carbon dioxide, metallurgy, electrolysis, decarbonization, carbon fee, technologies, taxes, state support

For citation: *Galinger A.A.* Assessment of Conditions for the Introduction of Hydrogen Technologies in Metallurgy in Russia // Scientific works: Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences. 2023. No. 4. Pp. 165-181.
DOI: 10.47711/2076-3182-2023-4-165-181