

Особенности современного экономического развития

УДК 338.45

DOI: 10.31249/kgt/2023.01.04

Роль зеленой электроэнергетики в экологизации европейской черной металлургии

Андрей Владимирович ЗИМАКОВ

кандидат экономических наук, научный сотрудник Центра европейских исследований

Национальный исследовательский институт мировой экономики и международных отношений им. Е.М. Примакова РАН (ИМЭМО РАН)

Профсоюзная ул., д. 23, г. Москва, Российская Федерация, 117997

E-mail: zimakov@newmail.ru

ORCID: 0000-0001-6574-6258

ЦИТИРОВАНИЕ: Зимаков А.В. Роль зеленой электроэнергетики в экологизации европейской черной металлургии // Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право. 2023. Т. 16. № 1. С. 69–85.
DOI: 10.31249/kgt/2023.01.04

Статья поступила в редакцию 12.01.2023.

Исправленный текст представлен 21.02.2023.

АННОТАЦИЯ. В статье анализируются перспективы декарбонизации европейской сталелитейной промышленности в условиях стремления Евросоюза к достижению климатической нейтральности с точки зрения той роли, которую в данном процессе играет электроэнергетика ЕС. Экологизация экономики ЕС начиналась с декарбонизации электроэнергетики, но постепенно фокус климатической политики Евросоюза стал расширяться, вовлекая в процесс более сложные для экологизации отрасли промышленности, и в первую очередь черную металлургию, учитывая высокий уровень выбросов доменно-конвертерного производства, связанного со сгоранием металлургических углей. Как показано в статье, в решении данного вопроса опыт

декарбонизации электроэнергетики по замещению угля биомассой и дооснащению системами улавливания CO_2 лишь ограниченно применим и не дает требуемого снижения выбросов. Наиболее высокие результаты по снижению выбросов дают только новые бескоксовые технологии (восстановительная плавка и прямое восстановление железа), модифицированные с целью максимального снижения выбросов CO_2 . Анализируя процесс становления бескоксовых технологий в странах Евросоюза, автор показывает, что их ключевой уязвимостью является зависимость от наличия стабильного зеленого энергоснабжения. Тем самым перспективы развития производства «зеленой» стали находятся в прямой зависимости от наличия достаточного количества

зеленой электроэнергии, а следовательно, от прогресса в трансформации европейской энергетики. Немаловажную роль в данном процессе будет также играть выбранная модель энергосистемы, что будет предопределять привлекательность размещения металлургических производств, а в конечном итоге – конкурентоспособность «зеленой» стали на внутреннем европейском и глобальном рынках.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЕС, черная металлургия, декарбонизация, энергетика, металлизация, прямое восстановление железа, биомасса, уголь.

В начале нового тысячелетия страны Евросоюза сделали осознанный выбор в пользу экологизации своих экономик, что нашло отражение в ряде общеевропейских программных документов, содержащих конкретные целевые параметры по достижению экологических задач в горизонте 2020, 2030 и 2050 гг. в рамках более широкой задачи достижения «климатической нейтральности». Это касается таких показателей, как снижение уровня выбросов парниковых газов в атмосферу, увеличение доли зеленой энергетики в конечном потреблении, повышение энергоэффективности. Первоначально основной акцент экологической политики был сделан на трансформации энергетического сектора. Причин этому несколько. Прежде всего, как в Европе, так и в мировых масштабах энергетика традиционно имеет наибольшую долю в выбросах парниковых газов (по данным Международного энергетического агентства, 41% глобальных выбросов CO₂ в 2017 г.). С другой стороны, в силу имеющихся экологических технологий энергетика (в первую очередь электроэнергетика) обладает наибольшим потенциалом среди других секторов по их минимизации. На-

ращивание генерирующих мощностей ВИЭ с постепенным вытеснением ими традиционных тепловых электростанций, работающих на буром и каменном угле, представлялось европейским политикам относительно легко достижимой задачей (*low hanging fruit*), по мере решения которой полученные результаты можно было бы использовать для экологизации других отраслей, прежде всего промышленных. Постепенно, по мере достижения определенных успехов в декарбонизации европейской энергетики, фокус климатической политики Евросоюза стал расширяться, вовлекая в процесс новые, более сложные для экологизации (*hard to abate*) отрасли индустрии [An industrial policy..., 2021]. В рамках «Зеленой сделки» особо выделена необходимость декарбонизации энергоинтенсивных отраслей промышленности, ответственных за 20% всех выбросов. Среди отраслей с высоким уровнем выбросов парниковых газов в атмосферу в прицеле экологической политики ЕС в первую очередь оказалась металлургическая промышленность, и прежде всего черная металлургия.

Европейская черная металлургия в фокусе климатической политики Евросоюза

Внимание европейской экологической политики к вопросу декарбонизации предприятий черной металлургии вполне закономерно. После европейской энергетики черная металлургия является вторым крупнейшим потребителем угля (18%) [IEA, 2018] и одним из лидеров в части выбросов парниковых газов. По данным Европейской схемы торговли квотами, учитывающей выбросы крупных предприятий и охватывающей около 40% выбросов парниковых газов всего Евросоюза, в 2021 г. на долю пред-

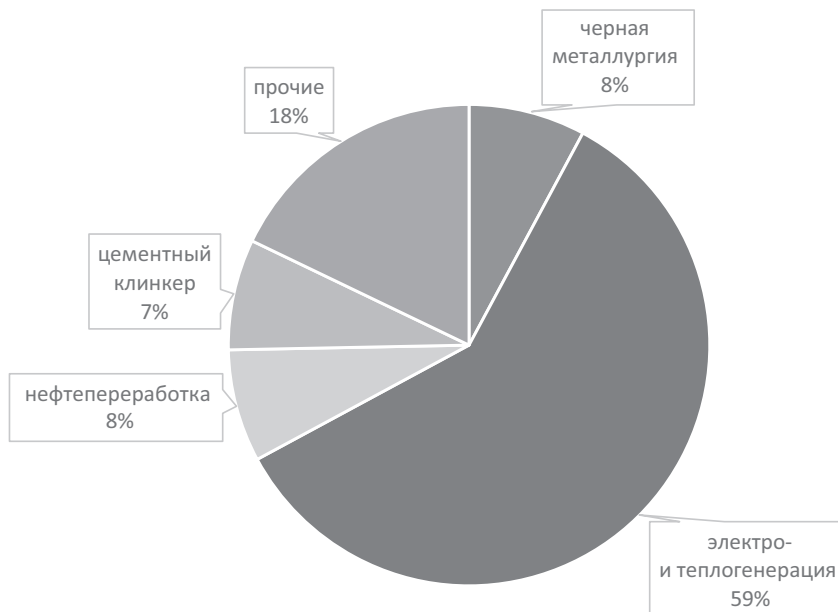


Рисунок 1. Выбросы CO₂ в атмосферу предприятий, учитываемых ЕСТК ЕС, по отраслям в 2021 г., %

Figure 1. CO₂-emissions of EU ETS covered utilities, by industry activity in 2021, %

Источник: расчеты автора по данным реестра Европейской схемы торговли квотами на выбросы парниковых газов. – URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/registry_en#tab-0-1 (дата обращения: 27.12.2022).

приятий черной металлургии приходилось почти 7,8% всех выбросов, учитываемых системой. Это намного меньше предприятий электроэнергетики (59%), традиционно образующих «костяк» (около десятка) наиболее экологически грязных предприятий Европы, но сопоставимо с другими отраслями-лидерами – нефтепереработкой и производством цементного клинкера (рисунок 1).

Тем не менее именно предприятия черной металлургии являются следующими после угольных ТЭС крупнейшими точечными эмитентами парниковых газов. Об этом свидетельствует антирейтинг наиболее грязных предприятий, в котором металлургические предприятия прочно занимают вторую десятку, в отдельные годы «прорываясь» в первую [Zimakov, 2021].

При этом, учитывая масштабы предприятий черной металлургии и неравномерность их географического размещения в ЕС, по отдельным странам картина доли выбросов металлургической промышленности существенно различается. Например, в Германии на долю черной металлургии приходится около 30% всех промышленных выбросов CO₂ [Handlungskonzept Stahl, 2020].

На долю европейской черной металлургии приходится 8% мирового производства стали. Еврокомиссия в своих коммюнике обычно указывает, что ЕС является вторым по объемам производителем в мире после Китая (54%), хотя такое сопоставление не совсем корректно, так как ЕС – это объединение, а в рамках самого Евросоюза пред-

Таблица 1. Производство стали в странах ЕС в 2021 г, млн т
Table 1. Steel production in EU countries in 2021, mln t

Страна ЕС	Производство
Германия	40,1
Италия	24,4
Испания	14,2
Франция	13,9
Польша	8,5
Австрия	7,9
Бельгия	6,9
Нидерланды	6,6
Словакия	4,9
Чехия	4,8
Швеция	4,7
Финляндия	4,3
Румыния	3,4
Люксембург	2,1
Греция	1,5
Венгрия	1,1
Словения	0,7
Болгария	0,5
Хорватия	0,2
Прочие страны ЕС	2,0
Всего ЕС	152,6

Источник: составлено автором по данным EUROFER. – URL: <https://www.eurofer.eu/> (дата обращения: 27.12.2022).

приятия черной металлургии расположены достаточно неравномерно. Среди стран ЕС наибольший объем производства – у Германии (26%), далее идут Италия (16%), Испания и Франция (по 9%). Значимые объемы выплавки стали имеются также в Польше, Австрии, Бельгии, Нидерландах, а также в Словакии и Чехии (таблица 1).

Согласно данным Европейской ассоциации стали (EUROFER), по технологии производства примерно 44%

приходится на электротермический способ и 56% – на конвертерный. В плане экологичности эти два способа довольно-таки существенно различаются. Углеродный след электросталеплавильного производства существенно ниже, так как, с одной стороны, он определяется в основном источником генерации используемой электроэнергии, а с другой – по большей части использует металлолом в качестве сырья, что означает отсутствие агломерационного процесса [Буторина И., Буторина М., 2019]. Озабоченность европейской климатической политики в основном адресована цепочке доменного производства с кислородным конвертером, в котором основная часть выбросов связана с доменным процессом (61%) и ассоциированным с ним производством металлургического кокса (27%) [Pardo, Moya, Vatoopoulos, 2012].

Не вдаваясь в детали металлургического производства, отметим, что при выплавке чугуна в домне используется преимущественно железорудное сырье, которое поступает в дому в форме агломерата одновременно с угольной шихтой. В процессе коксоаглодоменного передела происходит восстановление оксидов железа оксидом углерода, водородом и твердым углеродом, выделяющимся при сгорании топлива и кокса в доменной печи. Таким образом, доменный процесс неразрывно связан со сгоранием металлургических углей, что приводит к высоким выбросам CO₂.

В то же время энергетический уголь, сжигаемый на тепловых электростанциях, уже достаточно давно находится в прицеле климатической политики ЕС. За последнее десятилетие количество угольных электростанций в Евросоюзе значительно сократилось, ряд стран полностью прекратили угольную генерацию или установили сроки для остановки угольных ТЭС в стране. В ря-

де стран в качестве одного из инструментов, за счет которого дальнейшая эксплуатация угольных электростанций оказалась экономически неэффективной, стал углеродный налог. В других случаях было достигнуто политическое соглашение с энергетическими компаниями о закрытии электростанций. Вместе с тем данная политическая победа в интересах экологии привела к углублению экономической деградации европейской угледобывающих регионов, значительно обострив социально-экономические проблемы.

В этом плане для европейской черной металлургии, прямо и косвенно обеспечивающей занятость около 2,5 млн человек, давление климатической политики может оказаться фатальным и имеет все шансы привести к деиндустриализации с закрытием производств. Сталелитейные предприятия ЕС и без того находятся в условиях жесткой международной конкуренции, с трудом удерживая свои позиции в условиях мирового профицита металлургических мощностей [Хардтке, 2016; Керкхофф, 2018]. Поэтому экологизация европейской черной металлургии без существенного ущерба для отрасли является достаточно нетривиальной задачей.

Необходимо упомянуть еще одну причину, по которой черная металлургия привлекает внимание экологической политики Евросоюза. Это роль ее продукции как исходного материала в различных цепочках добавленной стоимости [Vogl, Åhman, Nilsson, 2021]. Климатическая политика ЕС делает особый акцент на последовательной декарбонизации всей цепочки, поэтому если в ее основе будет исходный материал с высоким углеродным следом, усилия по декарбонизации на последующих звеньях будут иметь малую эффективность для экологичности конечного продукта. В этой связи пере-

ход черной металлургии к производству «зеленой» стали как базового материала для множества прочих отраслей промышленности приобретает для Евросоюза особое значение.

Опыт декарбонизации электроэнергетики для экологизации европейской черной металлургии

Какие опции существуют у предприятий черной металлургии, чтобы всё же соответствовать постоянно ужесточающимся экологическим требованиям? Полное замещение доменно-конвертерного производства электродуговой плавкой (ЭДП) затруднительно по целому ряду причин: разный масштаб производства, разные виды производимой стали и, наконец, разное сырье. В этом случае кратно возросшую потребность в металлоломе было бы невозможно удовлетворить [Люнген, Шпрехер, 2017]. Поэтому необходимы технологические решения, позволяющие получать чугун и сталь из железной руды при низких выбросах CO_2 .

Прежде всего, определенной основой, от которой можно отталкиваться в поиске этих решений, могут стать разработки, полученные в ходе декарбонизации европейской электроэнергетики и даже, скорее, теплоэнергетики. Дело в том, что основные усилия климатической политики Евросоюза изначально были направлены на развитие генерации ВИЭ, которая должна постепенно вытеснить тепловые электростанции: сперва те, которые используют уголь или мазут, а в перспективе – и работающие на природном газе. Однако в процессе вывода из эксплуатации мощностей угольных электростанций европейские страны столкнулись с необходимостью модернизации когенерационных установок ТЭЦ, основной функцией которых наряду с выработ-

кой электроэнергии было обеспечение теплоснабжения. Одним из найденных решений стал перевод тепловых электростанций на более экологичный вид топлива, а именно на сжигание биомассы. Совместное сжигание с углем 10-30% биомассы не требует серьезного переоборудования ТЭС, и при этом позволяет улучшить экологические показатели предприятия. Полноценная конвертация на биотопливо требует дополнительных инвестиций, однако позволяет сохранить как само предприятие, так и всю используемую инфраструктуру. В результате практика перевода угольных ТЭС на биомассу получила в Европе достаточное распространение [Зимаков, 2020].

Европейские металлурги также уже достаточно давно изучают возможности использования различных видов биомассы для замещения угля на разных стадиях металлургического процесса. Из всех видов твердой биомассы для целей использования в металлургии наиболее пригодным оказался древесный уголь. В целом, согласно различным исследованиям, если рассматривать всю производственную цепочку, в доменно-конвертерном процессе древесный уголь может быть использован на разных стадиях, замещая частично или полностью традиционно используемый каменный уголь. Как правило, речь идет о замещении каменного угля биомассой на вспомогательных производствах и вторичных функциях: на агломерационной фабрике, в домне вместо коксовой мелочи и кокса более крупных фракций (кокового орешка). При этом ожидаемый уровень замещения варьируется в зависимости от функции в диапазоне от 50 до 100% [Possibilities..., 2018]. Что касается замены кокса в шихте, где тот выполняет роль не столько топлива, сколько восстановителя железа и опоры, то в этом случае без модернизации произ-

водства древесный уголь может играть лишь ограниченную роль. Вместе с тем при всех ограничениях в применимости использование древесного угля только во вспомогательных процессах, как заявляется, способно снизить уровень выбросов приблизительно на 20%. При этом не требуется принципиальное изменение технологического процесса выплавки чугуна и стали и, следовательно, сохраняются производственные мощности в текущей конфигурации при относительно незначительной модернизации.

Несмотря на привлекательность, у данного способа экологизации много недостатков. Прежде всего, надо понимать, что при замещении каменного угля биомассой речь не идет собственно о снижении уровня выбросов. При сжигании биомассы точно так же выделяется CO_2 , а абсолютный уровень выбросов может быть даже выше, что обусловлено меньшей теплотворностью и, следовательно, необходимостью в использовании большего количества древесного угля. Однако климатическая политика ЕС оценивает экологичность биомассы с позиции жизненного цикла: за период вегетации деревья поглощают как минимум столько же CO_2 , сколько потом выделяет биомасса при горении. Тем самым выращиваемые и используемые для получения биомассы леса компенсируют выбросы CO_2 . Этот подход «углеродной нейтральности» неоднократно подвергался критике, и поэтому Еврокомиссия вынуждена разрабатывать различные требования и ограничения на соответствие критерию «устойчивости», предъявляемые к используемой биомассе. Это, в свою очередь, ограничивает доступное предложение, потому что биоресурсы Европы достаточно лимитированы. Уместно напомнить, что в Европе в средние века технологический прорыв в выплавке чу-

гуна, связанный с переходом на кокс, был в том числе обусловлен запретом на вырубку лесов для производства древесного угля в металлургических целях, масштабы которой создавали угрозу дефорестации (в частности, в Англии в XV в.). Учитывая высокий спрос со стороны электро- и теплоэнергетики, вопрос источников доступной для европейской металлургии биомассы остается открытым.

Проблему выбросов парниковых газов при сжигании биомассы также планируется решать за счет систем улавливания и утилизации CO₂. Дооборудование данными системами традиционных электростанций рассматривается как допустимый способ их экологизации, хотя при этом не происходит перехода на возобновляемый источник энергии. Данный способ также может быть в ряде случаев применим для экологизации металлургических производств. Согласно оценкам, дооснащение традиционного доменно-конвертерного производства системами улавливания CO₂ способно снизить его уровень выбросов примерно в 2 раза. А наиболее оптимальный результат будет достигаться при использовании систем улавливания в комбинации с переходом на биомассу.

Среди европейских металлургических предприятий данный способ декарбонизации рассматривается как экономически жизнеспособный: об этом, в частности, заявляет руководство *ArcelorMittal*¹. В настоящий момент компания строит завод Генте (Бельгия) с преобразованием отходящих газов металлургического производства в биоэтанол. Вместе с тем уровень развития технологии системы улавливания и захоронения CO₂ по-

ка что находится на начальном этапе, в то время как ожидаемые масштабы его применения требуют сооружения значительных объемов мощностей по утилизации и захоронению, а также соответствующей транспортной инфраструктуры. А это пока в ЕС не просматривается.

Таким образом, опыт европейской энергетики по замещению угля на ТЭС биомассой оказывается лишь ограничено применимым для декарбонизации черной металлургии. По сути, он не решает главного вопроса – снижения абсолютного выброса парниковых газов в атмосферу. Кроме того, биомасса является не лучшей заменой кокса в качестве восстановителя металла, а значит, не способна обеспечить экологизацию основного процесса – источника выбросов CO₂. Более глубокая декарбонизация предприятий черной металлургии требует применения иных технологий.

Новые технологии получения «зеленой» стали в Евросоюзе

С точки зрения технологий черная металлургия является достаточно консервативной отраслью, что отчасти связано с высокими капитальными затратами. Например, последние мартеновские печи были закрыты в Европе только в 1995 г., а в России – в 2018. Если же говорить о доменном производстве, то его история насчитывает, по разным оценкам, как минимум 500 лет. Безусловно, за это время процесс достиг крайне высокой степени технологического совершенства: оптимизированы все составляющие, эффективность производства приближается к теоретически возможной. Вместе с тем, несмо-

1 BECCS beats hydrogen for decarbonizing steel in Europe: ArcelorMittal. // S&P Global Platts. – 2021. – May 18. – URL: <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/electric-power/051721-beccs-beats-hydrogen-for-decarbonizing-steel-in-europe-arcelo%E2%80%A6> (дата обращения: 29.12.2022).

тря на достигнутое снижение уровня выбросов на передовых предприятиях за счет высокой эффективности процесса (1,8 тонны CO_2 на тонну чугуна против среднего показателя 2,8 тонны) [Technologies and policies..., 2020], само по себе использование кокса (что также подразумевает его изготовление) неизбежно влечет за собой высокий уровень выбросов, несовместимый с целями декарбонизации. Поэтому в мировой черной металлургии уже достаточно давно ведется поиск альтернативных технологий получения чугуна или восстановленного железа в иной форме. Обобщая имеющиеся на сегодняшний момент бескоксовые технологии, обычно называют два способа: восстановительная плавка и прямое восстановление железа. По сути, это две большие группы различных технологий, имеющих в своей основе первый или второй способ [Zhiyuan, Friedmann, 2021]. Мотивы этих инновационных разработок были различными, но среди прочих с течением времени всё большую роль постепенно стал приобретать экологический аспект, то есть тот эффект снижения выбросов CO_2 , который потенциально мог быть получен в рамках данных технологий получения железа.

Потенциал подобных инновационных разработок для экологизации отрасли был своевременно оценен Евросоюзом. В частности, под эгидой и при софинансировании Евросоюза в 2004 г. появился проект разработки технологии сверхнизкоуглеродной выплавки стали (ULCOS) в составе консорциума, в который вошли 48 предприятий из 15 стран ЕС. На начальных этапах перед участниками проекта стояла задача оценки имеющихся перспективных разработок с позиции потенциала для создания полноценного производства стали при низких выбросах CO_2 . Среди прочих технологий наибольшее развитие получил про-

ект *HISARNA*, который предполагает восстановительную плавку с получением жидкого металла из руды без использования кокса, хотя и с применением угля, в двухстадийном процессе: предварительное восстановление руды в циклонной конвертерной печи и последующее восстановление до жидкого чугуна в плавильно-восстановительной емкости. Не вдаваясь в технологические подробности, достаточно будет сказать, что в данном процессе исключаются агломерационное и коксовое производства, а значит, и связанные с ними выбросы. При этом используемый уголь может быть полностью заменен на древесный. На выходе получается жидкий чугун, практически идентичный доменному, который далее может поступать в кислородный конвертер для выплавки стали.

Опытно-промышленная установка по данной технологии была построена в городе Эймёден в Нидерландах в 2010 г. Согласно полученным данным, применение этой технологии потенциально позволяет снизить количество выбросов CO_2 на 50-80% по сравнению с доменным производством. Данная технология восстановительной плавки является наиболее многообещающей по сравнению с другими способами, например коммерчески успешно реализованной технологией восстановительной плавки *Corex* (разработанной в Европе в 1970-1980-е гг.), где всё-таки приходится использовать кокс и не такое существенное снижение выбросов. В настоящее время компания *Tata Steel*, выкупившая права на технологию *Hisarna*, планирует строительство полномасштабного производства.

Другой наиболее развитой технологией получения железа без применения кокса является процесс прямого восстановления железа, или металлизация: процесс проходит при умеренных температурах с использованием

газа-восстановителя. Из всех известных вариантов этой технологии наибольшее развитие получила металлизация с использованием природного газа, который в результате конверсии разлагается на водород и угарный газ (технология *MIDREX*). В процессе металлизации под воздействием газа-восстановителя из железной руды получается губчатое железо, которое затем, как правило, поступает в электродуговую печь для выплавки стали.

Несмотря на отсутствие кокса, в процессе металлизации используется природный газ, а следовательно, такое производство не может рассматриваться как зеленая технология. В этой связи европейская металлургия модифицирует процесс металлизации с использованием в качестве газа-восстановителя водорода, получаемого без использования углеводородного сырья [Bhaskar, Assadi, Somehsaraei, 2020]. В 2020 г. в Лилле (Швеция) было введено в эксплуатацию опытно-промышленное производство губчатого железа по технологии *HYBRIT*, разрабатываемой консорциумом компаний *SSAB*, *LKAB* и *Vattenfall* при поддержке ЕС. Данная технология предполагает прямое восстановление железа из руды с использованием водорода, получаемого за счет электролиза воды. В марте 2021 г. этот же консорциум начал строительство первого завода промышленного масштаба в Елливаре. Согласно производственным планам компании *SSAB*, губчатое железо, получаемое по бескоксовой технологии, далее будет поступать в электродуговые печи для выплавки стали. С этой целью компания ведет реконструкцию доменной печи в Укселёсунд с ее преобразованием в электродуговую печь. Наряду с собственно металлургическими мощностями консорциум также строит подземное хранилище для накопления вырабатываемого водорода, который затем будет использовать-

ся на производстве. Тем самым будут обеспечиваться его бесперебойные поставки. Отметим, что поддержка данного проекта со стороны ЕС из фонда инноваций составит 143 млн евро.

В целом текущая бизнес-модель *SSAB* по строительству производств по технологии *HYBRIT* предполагает выбор в пользу менее крупных предприятий с технологической цепочкой металлизации и электродуговой плавки [SSAB, 2022]. По всей видимости, это решение обусловлено ключевой уязвимостью данной технологии, а именно зависимостью от наличия достаточного и стабильного источника энергоснабжения. Только в том случае, если весь цикл по производству водорода электролизом, прямому восстановлению железа и выплавке электростали будет осуществляться за счет зеленой электроэнергии, получаемый итоговый продукт может полноценно называться экологически чистой или «зеленой» сталью. Тем самым масштабирование и тиражирование такого энергоемкого предприятия оказывается напрямую ограничено наличием источников зеленой электроэнергии достаточной мощности [Decarbonising..., 2016].

Отсутствием достаточного гарантированного количества зеленой электроэнергии также обусловлены проблемы с конверсией производств прямого восстановления железа, работающих по классической технологии с использованием природного газа. Так, *ArcelorMittal* в сотрудничестве с *Midrex Technologies* работают над промежуточным решением, в котором для восстановления железа использовался бы исключительно водород, однако получаемый по-прежнему из природного газа. Данная технология в настоящий момент апробируется на предприятии металлизации *ArcelorMittal* в Гамбурге (Германия). Предполагается, что в дальнейшем, когда вопрос с получе-

нием зеленой электроэнергии будет решен, процесс получения водорода из природного газа можно будет заменить на электролиз воды.

Декарбонизированная электроэнергия и экологизация черной металлургии: проблемы и перспективы

В чем же заключается проблема с поставками зеленой электроэнергии? Ведь декарбонизация электроэнергетики в Евросоюзе, как декларируется, идет достаточно успешно. Доля ВИЭ в потреблении электроэнергии составила в 2020 г. свыше 37% в целом по ЕС, а в отдельных странах этот показатель значительно выше, например в Австрии (78%), Швеции (75%), Дании (65%), Португалии (58%). Вместе с тем процесс декарбонизации электроэнергетики Евросоюза имеет ряд проблем, которые только предстоит решить. Причем некоторые из них имеют критически важное значение для энергоемкой европейской черной металлургии.

Декарбонизация европейской энергетики представляет собой сложный комплексный процесс, который предполагает не просто замену одних источников электроэнергии (тепловых электростанций на угле и природном газе) другими (генерацией ВИЭ), но фактически означает смену действующей в настоящей момент парадигмы традиционной энергетики. Традиционная модель построена на принципах централизации генерирующих мощностей и ведущей роли потребителя – «производство электроэнергии следует за потреблением». Под эту модель создавалась сетевая инфраструктура, строились крупные электростанции, размещаемые как можно ближе к крупным потребителям (например, к металлургическим предприятиям). Стабильность поставок электроэнергии обе-

спечивалась в том числе за счет имеющейся гибкости в единой энергосистеме: часть генерирующих мощностей работала в базовом режиме на постоянной мощности, а другие («маневренные», пиковые) электростанции обеспечивали быстрое наращивание мощности при всплесках потребления.

Возобновляемая электроэнергетика (в первую очередь ветровая и солнечная) не обладает подобной гибкостью. Наоборот, генерация этих ВИЭ зависит от внешних природных условий и имеет переменный характер. Гидроэнергетика располагает большим запасом стабильности, но и в этом случае есть зависимость от природных факторов (засушливые годы, бесснежные зимы). Кроме того, строительство генерирующих мощностей ограничено наличием геофизических условий (ветроэнергетический потенциал, гидроресурсы и пр.), и масштабирование достаточно затруднительно. В целом электроэнергетика ВИЭ сделала ставку на децентрализацию генерации, а проблему с обеспечением стабильности достаточных объемов электроэнергии планирует решить за счет избыточных мощностей и создания более сложной сетевой архитектуры, включающей в себя накопители энергии, а также допускающей большую мобильность межсетевых перетоков электроэнергии.

Однако пока что построение такой сетевой архитектуры остается делом будущего, а в настоящее время энергосистемы ЕС вынуждены справляться с негативными явлениями, обусловленными процессом постепенной трансформации системы и связанными с этим периодически возникающими перекосами в генерации и потреблении. В целом энергосистемы ЕС достаточно успешно абсорбируют рост генерирующих мощностей ВИЭ и постепенное вытеснение традиционных мощностей. Однако для обеспечения

стабильными поставками крупнейших энергопотребителей именно зеленой электроэнергией еще предстоит пройти большой путь. А для предприятий черной металлургии, имеющих непрерывный производственный цикл, стабильность и надежность энергоснабжения является ключевым фактором.

Наличие достаточного количества зеленой электроэнергии ограничивает и другой путь экологизации европейской черной металлургии. Это постепенное увеличение доли металлургических предприятий с электродуговой плавкой, чей углеродный след при условии снабжения зеленой электроэнергией снижается до абсолютного минимума, на 99%, по сравнению с доменно-конвертерным производством. Как уже говорилось, вторым ограничивающим фактором является наличие сырья, а именно металлолома. С другой стороны, расширение производств, ориентированных на повторную переработку стали, хорошо укладывается в концепцию экономики замкнутого цикла, взятой на вооружение Евросоюзом. Кроме того, расширение производств по технологии прямого восстановления железа способно также отчасти преодолеть проблему дефицита металлолома. В целом в ЕС уже достаточно высокая доля электросталеплавильных предприятий (44%) по сравнению с соответствующим показателем в мировой черной металлургии (29%), однако есть потенциал для увеличения этой доли.

Согласно различным оценкам, в целом переход европейской металлургии на новые технологии получения стали приведет к трех-пятикратному росту потребления электроэнергии к 2050 г., а в абсолютных цифрах энергопотребление может составить от 200 до 350 тераватт-часов [Material Economics..., 2019]. Впрочем, есть и более пессимистичные оценки, предполагающие семикратный рост потребления электро-

энергии [EUROFER, 2019]. Основной прирост связывается с энергозатратами на получение водорода электролизом и электродуговой плавкой. Таким образом, европейская декарбонизованная электроэнергетика должна обеспечить достаточное количество электроэнергии с соответствующими характеристиками по надежности и стабильности поставок.

По сути, экологизация европейской черной металлургии ставится в прямую зависимость от успехов в сфере декарбонизации европейской электроэнергетики. Трансформация энергетики в разных европейских странах имеет свои особенности, обусловленные исходным укладом энергетического сектора. Вместе с тем обобщенно можно выделить две основные траектории этого процесса, имеющие своей целью следующие идеальные модели энергосистем: базирующаяся практически полностью на экологически чистой генерации (в различной комбинации постоянных и переменных ВИЭ) и модель, дополняемая использованием атомной энергии. С точки зрения перспектив декарбонизации черной металлургии в более выигрышном положении в этом плане оказались предприятия, размещенные в странах Евросоюза, где имеется развитая гидроэнергетика и/или АЭС, производство которыми электроэнергии является стабильным и надежным.

Ярким примером является Швеция, «энергомикс» которой обеспечивается на 39% АЭС, на 39% – ГЭС и на 19% – ветровыми электростанциями [Energy in Sweden..., 2021]. Неслучайно именно здесь размещается передовое предприятие по производству «зеленой» стали по технологии *HYBRIT*. Однако даже в таких условиях выбор делается в пользу ряда производств меньших размеров вместо одного крупного, так как это позволит снизить проблемы

со стабильностью поставок электроэнергии. Еще один пример строительства предприятия прямого восстановления железа на экологически чистом водороде в стране с АЭС и гидроэнергетикой – проект *ArcelorMittal* в Хихоне (Испания).

Следует оговориться, что наличие АЭС не является необходимой предпосылкой для декарбонизации сталелитейных предприятий. Австрийская *Voestalpine* взяла курс на полную декарбонизацию производства стали к 2035 г., в том числе на своем крупнейшем металлургическом предприятии в Линце (Австрия) с постепенным отказом от доменного производства в пользу процесса прямого восстановления на основе водорода и ЭДП. Высокий уровень электроэнергии ВИЭ (78% в потреблении) в стране обеспечивается в первую очередь развитой гидроэнергетикой.

Помимо упомянутых вопросов о необходимом количестве зеленой электроэнергии и ее качестве важным вопросом для черной металлургии является вопрос о ее стоимости. Ведь в структуре затрат «зеленого» металлургического предприятия будущего электроэнергия будет играть определяющую роль, особенно в случае прямого восстановления железа при помощи водорода [Axelson, Oberthür, Nilsson, 2021]. В настоящее время в ЕС активно обсуждается будущее и роль водорода, возможности синергии различных отраслей промышленности в водородной энергетике и промышленности будущего. Данный вопрос выходит за рамки настоящей статьи, отметим только, что появление рынка водорода ограничено тем, что сейчас отсутствуют как достаточный спрос на него, так и предложение, а также вся посредническая инфраструктура. Возможно, что со временем становление водорода как товара сможет каким-то об-

разом снизить затраты металлургических предприятий, но пока что им приходится рассчитывать на собственные производственные мощности. Даже если появятся внешние поставщики водорода, произведенного экологически чистым способом, то, скорее всего, это будут просто более крупные предприятия с электролизом воды, а стоимость зеленой электроэнергии останется определяющим фактором.

Таким образом, декарбонизация электроэнергетики, с чего, по сути, началась экологизация экономик стран ЕС, оказалась не просто наиболее легкодоступным решением, а основой для процесса декарбонизации не только других сфер энергетики – транспорта и теплоснабжения, но и крупных отраслей промышленности, ответственных за высокие выбросы парниковых газов в атмосферу. С одной стороны, опыт и инновационные наработки, использованные при отказе от сжигания угля на тепловых электростанциях, нашли в определенных объемах применение для снижения уровня выбросов предприятий черной металлургии. Это замещение каменного угля древесным и иной биомассой, а также дооснащение системами улавливания и захоронения CO₂. С другой стороны, фактическая электрификация новых процессов получения экологичной стали на основе декарбонизированной электроэнергии оказалась одним из наиболее жизнеспособных путей развития европейской черной металлургии.

Разумеется, это далекий от завершения процесс, и его успешность будет зависеть от множества факторов, таких как наличие финансирования замены основных средств металлургических производств, наличие достаточного и платежеспособного спроса на «зеленую» сталь, стоимость которой, оче-

видно, будет как минимум на 20% выше получаемой традиционным доменно-конвертерным способом, а также ее конкурентоспособность в контексте специально создаваемых торговых трансграничных механизмов (СВАМ) и прочих. Однако наряду с этим комплексом проблемных вопросов процесс экологизации европейской черной металлургии будет находиться в непосредственной зависимости от темпов трансформации европейской электроэнергетики, ее результатов, а также выбранной модели энергосистемы, которая, в свою очередь, будет предопределять привлекательность размещения металлургических производств, а также итоговую стоимость «зеленой» стали и ее конкурентоспособность на внутреннем европейском и глобальном рынках.

Список литературы

- Буторина И.В., Буторина М.В. Проблемы внедрения наилучших доступных технологий в черной металлургии // *Черные металлы*. – 2019. – № 1. – С. 43–48.
- Зимаков А.В. Биоэнергетика в ЕС: проблемы и перспективы // *Мировая экономика и международные отношения*. – 2020. – Т. 64, № 8. – С. 81–90. – DOI: 10.20542/0131-2227-2020-64-8-81-90.
- Керкхофф Х.Ю. Черная металлургия: растущая неопределенность // *Черные металлы*. – 2018. – № 5. – С. 61–65.
- Люнген Х.Б., Шпрехер М. Гибкие решения в сталелитейной отрасли для сокращения выбросов CO₂ и повышения эффективности производства // *Черные металлы*. – 2017. – № 11. – С. 64–71.
- Хардтке К. Европейская черная металлургия в тяжелом положении // *Черные металлы*. – 2016. – № 11. – С. 72–76.
- An industrial policy framework for transforming energy and emissions intensive industries towards zero emissions / Nilsson L.J., Bauer F., Åhman M., Andersson F.N.G., Bataille Ch., de la Rue du Can S., Ericsson K., Hansen T., Johansson B., Lechtenböhmer S., van Sluisvel-da M., Vogl V. // *Climate Policy*. – 2021. – Vol. 21, N 8. – P. 1053–1065. – DOI: – 10.1080/14693062.2021.1957665.
- Axelsson M., Oberthür S., Nilsson L.J. Emission reduction strategies in the EU steel industry: Implications for business model innovation // *Journal of Industrial Ecology*. – 2021. – Vol. 25, issue 2. – P. 390–402. – DOI: 10.1111/jiec.13124.
- Bhaskar A., Assadi M., Somehsaraei H. Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen // *Energies*. – 2020. – Vol. 13, N 3. – P. 1–23. – DOI: 10.3390/en13030758.
- Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification – Implications for future EU electricity demand / Lechtenböhmer S., Nilsson L.J., Åhman M., Schneider C. // *Energy*. – 2016. – Vol. 115, November. – P. 1623–1631. – DOI: 10.1016/j.energy.2016.07.110.
- Energy in Sweden 2021, an Overview. – Eskilstuna : Swedish Energy Agency, 2021. – 18 p. – URL: <https://www.energimyndigheten.se/en/news/2021/an-overview-of-energy-in-sweden-2021-now-available/> (дата обращения: 29.12.2022).
- EUROFER Low carbon roadmap: Pathways to a CO₂-neutral European steel industry. – Brussel : EUROFER AISB, 2019. – 18 p. – URL: <https://www.eurofer.eu/assets/Uploads/EUROFER-Low-Carbon-Roadmap-Pathways-to-a-CO2-neutral-European-Steel-Industry.pdf> (дата обращения: 29.12.2022).
- Handlungskonzept Stahl. – Berlin : Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020. – 24 S. – URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/handlungskonzept-stahl.html> (дата обращения: 29.12.2022).
- IEA Coal 2018. – Paris: IEA, 2018. – 153p. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/as->

sets/85b9fc1b-74a6-477e-8052-81bb0d-821f4a/Coal_2018.pdf (дата обращения: 29.12.2022).

Material Economics Industrial Transformation 2050 – Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry. – Cambridge : University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership, 2019. – 208 p. – URL: <https://materialeconomics.com/material-economics-industrial-transformation-2050.pdf> (дата обращения: 29.12.2022).

Pardo N., Moya J.A., Vatopoulos K. Prospective Scenarios on Energy Efficiency and CO₂ Emissions in the EU Iron & Steel Industry. – Luxembourg : Joint Research Council, 2012. – 50 p. – DOI: 10.2790/64264.

Possibilities for CO₂ emission reduction using biomass in European integrated steel plants / Mandova H., Leduc S., Wang C., Wetterlund E., Patrizio P., Gale W., Kraxner F. // Biomass and Bioenergy. – 2018. – Vol. 115, August. – P. 231–243. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.04.021.

SSAB plans a new Nordic production system and to bring forward the green transition. Regulatory press release. January 28, 2022. URL: <https://www.ssab.com/en/news/2022/01/ssab-plans-a-new-nordic-production-system-and-to-bring-forward-the-green-transition> (дата обращения: 29.12.2022).

Technology and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070 / Rissman J. [et al.] // Applied Energy. – 2020. – Vol. 266, May. – Article number: 114848. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114848.

Vogl V., Åhman M., Nilsson L.J. The making of green steel in the EU: a policy evaluation for the early commercialization phase // Climate Policy. – 2021. – Vol. 21, N 1. – P. 78–92. – DOI: 10.1080/14693062.2020.1803040.

Zimakov A. The EU ETS top ten polluters list as a policy tool of climate action organisations // European Journal of Sustainable Development. – 2021. – Vol. 10, N 2. – P. 201–218. – DOI: 10.14207/ejsd.2021.v10n2p201.

Zhiyuan F., Friedmann S. Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy // Joule. – 2021. – N 5. – P. 829–862. – DOI: 10.1016/j.joule.2021.02.018.

Specifics of Modern Economic Development

DOI: 10.31249/kgt/2023.01.04

The Role of Green Electricity in European Steel Industry Decarbonization

Andrei V. ZIMAKOV

PhD (Econ.), Research Fellow, Center for European Studies

Primakov National Research Institute of World Economy and International Relations,
Russian Academy of Sciences (IMEMO RAN)

Profsoyuznaya Street, 23, Moscow, Russian Federation, 117997

E-mail: zimakov@newmail.ru

ORCID: 0000-0001-6574-6258

CITATION: Zimakov A.V. (2023). The Role of Green Electricity in European Steel Industry Decarbonization. *Outlines of Global Transformations: Politics, Economics, Law*. vol. 16, no. 1, pp. 69–85 (in Russian).
DOI: 10.31249/kgt/2023.01.04

Received: 12.01.2023.

Revised: 21.02.2023.

ABSTRACT. *The article analyses the prospects of European steel industry decarbonization as part of the general accord to achieve climate neutrality and the role of decarbonized electricity in this process. The decarbonization of the EU economy started with energy sector but the focus of the EU climate policy gradually shifted to other carbon-intensive hard-to-abate industries, with steel industry as a major polluter due to Blast Furnace – Oxygen Converter cycle coal burning. The article shows that the positive experience of power sector decarbonization through coal substitution by biomass and carbon-capture retrofits are only partially applicable and do not deliver desired results. A much better solution is new low-carbon technologies of smelting reduction and direct reduction of iron, modified to achieve significant drop in CO₂ emissions. Analyzing the development and implementation of low-carbon iron production technologies in EU countries the author shows that their natural limit rests with*

its dependence on secure green power supply. That means that the development of European green steel production is linked to availability of sufficient amounts of decarbonized electricity, and therefore, is dependent on the progress in EU energy sector decarbonization and its outcome. The chosen model of the energy system is also of high importance, because it will determine the ability of the countries to attract new production sites, and ultimately whether European green steel will be competitive on local and global markets.

KEYWORDS: EU, steel industry, decarbonization, energy, direct reduction of iron, biomass, coal.

References

An industrial policy... (2021). Nilsson L.J. et al. An industrial policy framework for transforming energy and emissions intensive industries towards zero emissions. *Cli-*

mate Policy. Vol. 21, no. 8, pp. 1053–1065. DOI: 10.1080/14693062.2021.1957665.

Axelson M., Oberthür S., Nilsson L.J. (2021). Emission reduction strategies in the EU steel industry: Implications for business model innovation. *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 25, Issue 2, pp. 390–402. DOI: 10.1111/jiec.13124.

Bhaskar A., Assadi M., Somehsaraei H. (2020). Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen *Energies*. Vol. 13, no. 3, pp. 1–23. DOI:10.3390/en13030758.

Butorina I.V., Butorina M.V. (2019). Problems of best available technologies implementation in steel industry. *Chiornye metally*. No. 1, pp. 43–48 (in Russian).

Decarbonising... (2016). Lechtenböhrmer S. Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification – Implications for future EU electricity demand. *Energy*. Vol. 115, November, pp. 1623–1631. DOI: 10.1016/j.energy.2016.07.110.

Energy in Sweden 2021, an Overview (2021). Eskilstuna: Swedish Energy Agency, 18 pp. Available at: <https://www.energimyndigheten.se/en/news/2021/an-overview-of-energy-in-sweden-2021-now-available/>, accessed 29.12.2022.

EUROFER (2019). *Low carbon roadmap: Pathways to a CO₂-neutral European steel industry*. Brussel: EUROFER AISB, 18 pp. Available at: <https://www.eurofer.eu/assets/Uploads/EUROFER-Low-Carbon-Roadmap-Pathways-to-a-CO2-neutral-European-Steel-Industry.pdf>, accessed 29.12.2022.

Handlungskonzept Stahl (2020). Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 24 pp. Available at: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/handlungskonzept-stahl.html>, accessed 29.12.2022.

Hardtke K. (2016). European steel industry in hard situation *Chiornye metally*. No. 11, pp. 72–76 (in Russian).

IEA (2018). *Coal 2018*. Paris: IEA, 153 pp. Available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/85b9fc1b-74a6-477e-8052-81bb0d821f4a/Coal_2018.pdf, accessed 29.12.2022.

Kerkhoff H.Y. (2018). Steel industry: growing instability. *Chiornye metally*. No. 5, pp. 61–65 (in Russian).

Lungen H.B., Spracher M. (2017). Flexible solutions in steel industry to reduce CO₂ emissions and improve productivity. *Chiornye metally*. No. 11, pp. 64–71 (in Russian).

Material Economics (2019) *Industrial Transformation 2050 – Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry*. Cambridge: University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership, 208 p. Available at: <https://materialeconomics.com/material-economics-industrial-transformation-2050.pdf>, accessed 29.12.2022.

Pardo N., Moya J.A., Vatopoulos K. (2012). *Prospective Scenarios on Energy Efficiency and CO₂ Emissions in the EU Iron & Steel Industry*. Luxemburg: Joint Research Council, 50 pp. DOI: 10.2790/64264.

Possibilities... (2018). Mandova H. et al. Possibilities for CO₂ emission reduction using biomass in European integrated steel plants. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 115, August, pp. 231–243. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.04.021.

SSAB *plans a new Nordic production system and to bring forward the green transition* (2022). Regulatory press release. January 28. Available at: <https://www.ssab.com/en/news/2022/01/ssab-plans-a-new-nordic-production-system-and-to-bring-forward-the-green-transition>, accessed: 29.12.2022.

Technologies and policies... (2020). Rissman J. et al. Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*, Vol. 266, May, pp. 114848. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114848.

Vogl V., Åhman M., Nilsson L.J. (2021). The making of green steel in the EU: a policy evaluation for the early commercialization phase. *Climate Policy*. Vol. 21, no. 1, pp. 78–92. DOI: 10.1080/14693062.2020.1803040.

Zimakov A. (2020). Bioenergy in EU: problems and prospects. *Mirovaya Ekonomika I Mezhdunarodnye Otnosheniya*. Vol. 64, no. 8, pp. 81–90. (in Russian). DOI: 10.20542/0131-2227-2020-64-8-81-90.

Zimakov A. (2021). The EU ETS top ten polluters list as a policy tool of climate action organizations. *European Journal of Sustainable Development*. Vol. 10, no. 2, pp. 201–218. DOI: 10.14207/ejsd.2021.v10n2p201.

Zhiyuan F., Friedmann S. (2021). Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. *Joule*. Vol. 5, pp. 829–862. DOI: 10.1016/j.joule.2021.02.018.