

ОЦЕНКА УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ПРОИЗВОДСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

¹Ю.В. Мозжегорова, ¹Г.В. Ильиных, ¹В.Н. Коротаев

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Представлены результаты анализа производства конструкционных материалов, используемых для изготовления оборудования, обеспечивающего жизненный цикл водорода. Выявлены аспекты жизненного цикла основных конструкционных материалов (сталь, алюминий, никель, медь, титан, платина, углепластики), применяемых в водородной энергетике. Приведены результаты оценки углеродного следа при производстве данных материалов в зависимости от технологий производства, используемого источника энергии и вторичного сырья. Установлено, что при создании водородной газотурбинной установки (ГТУ) основной вклад в углеродный след оказывают титановые (50,9 %) и никелевые (37,6 %) сплавы, несмотря на то, что более чем на 50 % ГТУ состоит из стали. Определено, что при производстве твердополимерных топливных элементов основной вклад в углеродный след вносят наименьшие по содержанию конструкционные материалы – платина (78,1 %) и углепластики (15,7 %) ввиду того, что имеют наибольший углеродный след на кг производимого материала.

Ключевые слова: углеродный след, конструкционные материалы, водородная энергетика

Статья поступила в редакцию 19.03.2024, доработана 27.08.2024, принята к публикации 05.09.2024

Assessment of the Carbon Footprint of Production of Construction Materials Used in Hydrogen Energy

¹Yu.V. Mozzhegorova, ¹G.V. Ilinykh, ¹V.N. Korotaev

¹Perm National Research Polytechnic University, 614000 Perm, Russia

The results of the analysis of production of construction materials used for manufacturing hydrogen life cycle equipment are presented. The aspects of the life cycle of the main construction materials (steel, aluminum, nickel, copper, titanium, platinum, carbon plastics) used in hydrogen power engineering are identified. The results of the carbon footprint assessment for the production of these materials are presented depending on the production technologies, the energy source used and the secondary raw materials. It is established that in the development of a hydrogen gas turbine unit (GTU) the main contribution to carbon footprint is made by titanium (50,9 %) and nickel (37,6 %) alloys, in spite of the fact that more than 50 % of GTU consists of steel. It has been determined that in the production of solid-polymer fuel cells the main contribution to the carbon footprint is made by the smallest construction materials — platinum (78,1 %) and carbon plastics (15,7 %) due to the fact that they have the largest carbon footprint per kg of produced material.

Keywords: carbon footprint, construction materials, hydrogen energy

Received 19.03.2024, revised 27.08.2024, accepted for publication 05.09.2024

DOI: 10.18412/1816-0395-2024-11-33-39

В настоящее время актуальным является использование экологически чистой, надежной и относительно экономичной энергии. На сегодняшний день ведутся активные разработки и исследования в области водородной энергетики, поскольку водород является топливом, при сжигании которого не образуются парниковые газы, а для его получения могут использоваться такие неисчерпаемые ресурсы, как вода и энергия солнца. Актуальность применения водорода в каче-

стве топлива обусловлена ограниченностью углеводородных источников энергии, негативным влиянием традиционных топлив на окружающую среду, недостаточной эффективностью "зеленой" энергетики [1].

В соответствии с Концепцией развития Водородной энергетики РФ помимо разработки и внедрения технологий получения низкоуглеродного водорода приоритетным является развитие производства оборудования, материалов, комплектующих и технологий применения водо-

родных энергоносителей в различных секторах экономики. Водород может быть использован в таких энергетических установках, как топливные элементы, двигатели внутреннего сгорания и газовые турбины. Однако для получения ожидаемого эффекта требуется достоверное определение углеродного следа на протяжении всего жизненного цикла водорода — от добычи сырья до конечного использования с учетом расхода основных ресурсов (электроэнергия, тепло, водопотребление и т.д.).

Основные конструкционные материалы, используемые в водородной энергетике, подразделяются на металлы и их сплавы (сталь, алюминий, никель и т.д.) и неметаллические материалы (композиты, полимеры и др.) [2–7].

Производство конструкционных материалов приводит к значительным воздействиям на окружающую среду, таким как выбросы парниковых газов, истощение природных ресурсов, потребление больших объемов водных ресурсов и т.д. Углеродный след конструкционных материалов может зависеть от добываемого сырья, технологий производства, используемого источника энергии, использования переработанного (вторичного) сырья, технологий улавливания и утилизации углекислого газа и пр. Таким образом, оценка углеродного следа и выявление аспектов жизненного цикла основных конструкционных материалов, использующихся

для производства оборудования, устройств и систем для водородной энергетике, является актуальной задачей.

В большинстве случаев в существующих исследованиях представлена оценка выбросов парниковых газов при производстве конструкционных материалов для оборудования, устройств и систем, используемых только на отдельных этапах жизненного цикла водорода. Данное исследование включает оценку углеродного следа при производстве основных конструкционных материалов на всех этапах жизненного цикла водорода.

Конструкционные материалы

Оборудование, устройства и системы, используемые на этапах жизненного цикла водорода, состоят из большого количества конструкционных материалов (более 30), в том числе различных сплавов, комбинированных и композиционных ма-

териалов. Оценка жизненного цикла устройств с декомпозицией на всю номенклатуру используемых конструкционных материалов связана с большими ограничениями, прежде всего доступностью актуальной информации. Поэтому на практике для оценки жизненного цикла устройств используют до 8–10 разновидностей приоритетных материалов, образующих основные выбросы парниковых газов при производстве.

Для анализа конструкционных материалов, применяемых в водородной энергетике, рассмотрены этапы жизненного цикла водорода с наиболее часто применяющимися технологиями:

- производство водорода — электролиз воды с протонообменной мембраной (ПОМ), электролиз воды в твердооксидном электролизере (ТОЭ), паровой риформинг метана;
- транспортировки водорода — трубопроводы, автоцистерны;
- хранения водорода — резервуары для сжатого и сжиженного водорода;
- использования водорода для производства электроэнергии — твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ), твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), газотурбинные установки (ГТУ).

В зависимости от технологии производства водорода, способа транспортировки и хранения водорода и устройства для его использования применяемая номенклатура конструкционных материалов может значительно различаться (табл. 1).

Для производства электролизеров с ПОМ используются металлы, такие как сталь, алюминевые, никелевые и медные сплавы, среди неметаллических материалов — композиты (углепластик, стеклопластик), синтетический каучук [4]. В твердооксидном электролизере помимо основных металлов используется перовскит в качестве катода, никелевые сплавы для анода и покрытия из керамических материалов для электродов. Установки по паровому риформингу ме-

Таблица 1. Конструкционные материалы, используемые на этапах жизненного цикла водорода

Table 1. Construction materials used in the stages of the hydrogen life cycle

Этап жизненного цикла водорода	Металлы					Неметаллические материалы		
	Сталь	Алюминий и его сплавы	Никель и его сплавы	Медь и ее сплавы	Прочее	Композиты	Полимеры	Прочее
Получение:								
электролиз воды с ПОМ [4]	+	+	+	+	Платина Кобальт	Углепластик, стеклопластик	ПЭВД Нейлон	Синтетический каучук
электролиз воды в ТОЭ [4, 5]	+	–	+	+	Платина	–	–	Керамика
паровой риформинг метана [6]	+	+	+	–	Платина	–	–	Керамика
Транспортировка:								
трубопроводы [2]	+	+	–	+	Кобальт	–	ПЭВД	–
автоцистерны [7]	+	+	–	–	–	Углепластик	ПЭВД ПА	–
Хранение:								
резервуары для сжатого водорода [5]	+	+	+	+	–	Углепластик	ПЭВД Нейлон	–
резервуары для сжиженного водорода [7]	+	+	–	–	Титан	Углепластик	–	–
Использование:								
ТПТЭ [5]	+	–	+	+	Титан Платина	Углепластик	ПЭТ	Графен, силикон
ТОТЭ [2, 5]	+	–	+	–	Платина	–	ПВХ	Керамика
ГТУ [3]	+	+	+	–	Титан	–	–	–

Примечание. ПЭВД – полиэтилен высокого давления, ПЭВД – полиэтилен низкого давления, ПА – полиамид, ПЭТ – полиэтилентерефталат, ПВХ – поливинилхлорид.

тана состоят из конструкционных материалов в виде стали, алюминиевых и никелевых сплавов, для мембран используется платина и керамические материалы [6].

Конструкционные материалы, используемые для систем и устройств по транспортировке и хранению водорода, подбираются таким образом, чтобы они выдерживали необходимые условия (температуру, давление), имели необходимые механические характеристики и не подвергались водородному охрупчиванию.

При использовании автомобильного транспорта водород перевозят в автоцистернах либо в сжатой газообразной форме, либо в жидкой форме. Основными конструкционными материалами, которые используются для автоцистерн, являются аустенитная коррозионно-стойкая сталь и алюминиевые сплавы [7]. В некоторых случаях вкладыши для автоцистерн могут изготавливаться из ПЭНД (полиамида), для укрепления стенок цистерн — углепластики.

При производстве трубопроводов для транспортировки водорода используются сталь, алюминиевые и медные сплавы, а также полимерные материалы. Пластик, такой как ПЭВД, используется при облицовке труб небольшого диаметра (толщина слоя 5 мм), обеспечивая гибкость и устойчивость к коррозии. В настоящее время при изготовлении труб для транспортировки водорода используются низкоуглеродные стали с покрытиями или лайнерами из алюминиевых или медных сплавов, что увеличивает устойчивость к водородной коррозии и срок службы, снижая при этом потери водорода при транспортировке [2].

При производстве резервуаров для хранения сжатого водорода используются сталь, алюминиевые, никелевые и медные сплавы, углепластик, ПЭНД и нейлон. Для хранения сжиженного водорода — сталь, алюминиевые и титановые сплавы, углепластик и стеклопластик [5,

7]. Для хранения или транспортирования сжатого водорода при давлениях 350–700 бар используются резервуары, изготовленные из композитов (углепластики) с вкладышами и закладными из стали, алюминия либо с полимерными покрытиями [5].

При анализе ранее проведенных исследований по оценке этапа производства устройств по использованию водорода для производства электроэнергии (топливные элементы, ГТУ) [2, 3, 6] было установлено, что учитывают порядка 2–15 различных конструкционных материалов. Основными материалами для производства топливных элементов является сталь (более 60 %), используемая для корпусных комплектующих, никелевые и медные сплавы, полимеры, углепластики и титан (в случае с ТПТЭ) и платина для изготовления катализаторов для основных токообразующих реакций [2, 5]. В ТОТЭ в качестве электролита, проводящего ионы кислорода, используется изолирующая твердооксидная керамика, чаще всего из циркония, стабилизированного иттрием. [2, 5]. При оценке этапа производства ГТУ в среднем выделяются 4–5 материалов, основными из которых являются металлы: сталь, алюминий, титан и никель [3].

На основании проведенного анализа конструкционных материалов, используемых на этапах жизненного цикла водорода, для последующей оценки были выбраны приоритетные материалы, используемые в большем количестве и/или образующие наибольший углеродный след при производстве — сталь, алюминий, никель, медь, титан и их сплавы, платина, углепластик.

Влияние жизненного цикла конструкционных материалов на углеродный след

Углеродный след конструкционных материалов так или иначе связан с различными аспектами жизненного цикла.

Углеродный след при производстве конструкционных материалов зависит от технологии и метода производства (например, доменная или электродуговая печь для стали), используемого сырья (первичное сырье или вторичное сырье), источника используемой электроэнергии (ТЭС, АЭС, ВЭИ и т.д.) и т.д.

Сталь. Для производства устройств и систем, используемых в водородной энергетике, сталь является одним из основных металлов. Производство чугуна и стали входит в число крупнейших промышленных источников выбросов углекислого газа в мире, на их долю приходится 25–30 % производственного сектора и 6–8 % общих выбросов парниковых газов в мире. Углеродный след выпуска стали складывается из трех этапов производства: добыча железной руды, получение железа и выплавка стали. Добыча железной руды относительно углеродоэффективна (0,25 т CO_2 -экв./т). Технологии выплавки стали оказывают значительное влияние на углеродный след. При использовании доменной печи с последующим выжиганием углерода в кислородно-конвертерном процессе выбросы составляют 2,32 т CO_2 -экв./т стали, при переплавке в электродуговой печи с использованием металлолома — 0,67 т CO_2 -экв./т, с использованием железа прямого восстановления — 1,65 т CO_2 -экв./т [8].

На выбросы CO_2 влияет источник электроэнергии. Так, углеродный след стали, произведенной с использованием электроэнергии, полученной из угля, составляет 1,9 т CO_2 -экв./т, при использовании ВИЭ и природного газа — 1,4 т CO_2 -экв./т, при использовании ВИЭ и водорода — 0,76 т CO_2 -экв./т. Каждая тонна лома, используемого для производства стали, позволяет снизить углеродный след до 0,4 т CO_2 -экв./т, потребление сырья, используемого для производства первичного материала, — 1,4 т железной руды, 740 кг угля и 120 кг известняка [8].

Алюминий и его сплавы. В настоящее время почти во всех процессах первичной выплавки алюминия используются угольные аноды, которые выделяют CO_2 в процессе электролиза (4,28 т CO_2 -экв./т). Подразделение компании "TÜV AUSTRIA Standards & Compliance" (Австрия) провело независимую верификацию показателей выбросов парниковых газов при производстве алюминия на Красноярском алюминиевом заводе "РУСАЛ" (Россия) и подтвердило, что алюминий, произведённый по технологии инертного анода с использованием энергии ГЭС, имеет удельные выбросы — 0,01 т CO_2 -экв./т металла. В зависимости от используемой энергии для производства алюминия углеродный след при использовании угля составляет 16,5 т CO_2 -экв./т, при использовании природного газа — 7,5 т CO_2 -экв./т, ГЭС — 2,4 т CO_2 -экв./т. Углеродный след при использовании вторичного сырья для производства алюминиевых сплавов составляет 0,6 т CO_2 -экв./т. При этом энергетические затраты на переплавку алюминия составляют всего 5 % от энергетических затрат на производство первичного алюминия [9].

Никель и его сплавы. Углеродный след никеля зависит от того, из какой руды он был произведен и какого класса. Углеродный след никеля класса 1 из сульфидной руды составляет 7,19 т CO_2 -экв./т, из латеритной руды — 27,5 т CO_2 -экв./т. Углеродный след никеля, произведённого с использованием угля, составляет 14,0 т CO_2 -экв./т, смешанных источников энергии — 14,0 т CO_2 -экв./т, с использованием ГЭС — 7,0 т CO_2 -экв./т, с использованием энергии природного газа — 6,0 т CO_2 -экв./т [10]. Никель и его сплавы, включая коррозионностойкие и жаропрочные сплавы (к примеру, используются в камере сгорания, турбине высокого давления и силовой турбине ГТУ), практически на 100 % подлежат вторичной переработке и могут быть переработаны бесконечно

без потери качества. Никель сохраняет большую часть своей первичной металлической ценности: ломы премиум-класса обычно содержат не менее 95 % стоимости первичного металла [11].

Медь и ее сплавы. Основными факторами, влияющими на углеродный след меди, являются использование различных марок руд и источников электроэнергии. Углеродный след производства меди и его сплавов в зависимости от производственного процесса (технологии плавки): при использовании пиromеталлургического метода — 1,1–8,5 т CO_2 -экв./т; при использовании гидрометаллургического метода — 1,1–7,6 т CO_2 -экв./т [12]. Использование разных источников энергии для производства меди влияет на углеродный след, при использовании смешанных источников энергии — 3,2 т CO_2 -экв./т, при использовании ВИЭ — 0,6 т CO_2 -экв./т. Вторичную медь можно извлечь из большинства видов конечной продукции и вернуть в производственный процесс без потери качества при переработке. Получение вторичной меди зависит от качества исходного материала и используемого металлургического процесса, при этом углеродный след снижается до 0,2–1,9 т CO_2 -экв./т [12].

Титан и его сплавы. Процесс получения металлического титана из руды достаточно трудоёмкий и дорогостоящий. Российская компания "ВСМПО-АВИСМА" — крупнейший в мире производитель титана, на долю которого приходится около 25 % мирового рынка титана. Углеродный след производства титановых сплавов зависит от многих факторов, таких как первичное сырьё, технология производства, источник электроэнергии, и составляет от 3,2 до 37,0 т CO_2 -экв./т. При производстве титана из природного рутила методом Кролла углеродный след составляет 35,6 т CO_2 -экв./т [13]. Использование переработанных титановых порошков при производстве тита-

на снижают углеродный след до 7,8 т CO_2 -экв./т. Однако при использовании переработанных титановых сплавов ограничены возможности изготовления ответственных деталей для ГТУ вследствие снижения у получаемых изделий прочностных свойств и устойчивости к высоким температурам.

Платина. Платина является чрезвычайно дефицитным ресурсом. С физико-химической точки зрения платина отличается высокой стабильностью и проявляет исключительную каталитическую активность, что делает ее наиболее широко используемым материалом в электролизерах и топливных элементах. Платина добывается и производится, в частности, в таких странах, как Южно-Африканская Республика, Российская Федерация, Канада, США, Зимбабве и Колумбия [14].

По данным работы [14], использование переработанной платины позволит снизить углеродный след до 1,35 тыс. т CO_2 -экв./т, что на 95 % ниже в сравнении с углеродным следом первичной платины (27,0 тыс. т CO_2 -экв./т). Значительное экологическое преимущество переработанной платины объясняется затратами энергии на первичную добычу руды, которые в 70–100 раз превышают затраты на переработку платины по сравнению с добычей руды.

Углепластики. Углепластики отличаются высокой прочностью, жесткостью, малой массой и по удельным характеристикам могут превосходить конструкционную сталь.

Углеродный след производства углепластика зависит от сырья, используемого для производства углеродного волокна (УВ). Так, при использовании УВ в углепластике на основе полиакрилонитрила (ПАН) углеродный след составляет 38,9 т CO_2 -экв./т, при использовании УВ на основе лигнина — 1,5 т CO_2 -экв./т. При использовании природного газа как источника энергии углеродный след углепластика составляет 21,51 т

CO₂-экв./т, при использовании ВИЭ — 10,43 т CO₂-экв./т. Напрямую использование переработанного углепластика невозможно, так как необходима достаточно сложная схема обращения с отходами углепластика. Для производства углепластика может использоваться вторичное УВ, имеющее меньший углеродный след (2,6 т CO₂-экв./т) в сравнении с первичным УВ (22,4 т CO₂-экв./т), при этом снижается потребление электроэнергии на 15 % [15].

Производство рассмотренных конструкционных материалов ежегодно увеличивается и имеет повышенный спрос в водородной энергетике, что приводит к увеличению выбросов парниковых газов. Для снижения выбросов парниковых газов при производстве конструкционных материалов необходимо увеличить переработку руд более низкого качества (для металлов), использовать вторичное сырье и ВИЭ. Можно ожидать, что по мере развития технологий и оптимизации производственных процессов углеродный след конструкционных материалов из вторичного сырья будет снижаться. С другой стороны, углеродный след для производства металлов из первичных источников со временем будет увеличиваться вследствие снижения содержания руд.

Углеродный след при производстве конструкционных материалов

Углеродный след производства конструкционных материалов различается в России и в мире вследствие разницы используемого сырья, способа добычи/производства, используемых источников энергии, доли используемого вторичного сырья. В табл. 2 представлены средние значения углеродного следа основных конструкционных материалов в мире и в России.

Из полученных результатов видно, что углеродный след производства стали, алюминия и никеля в РФ ниже, чем угле-

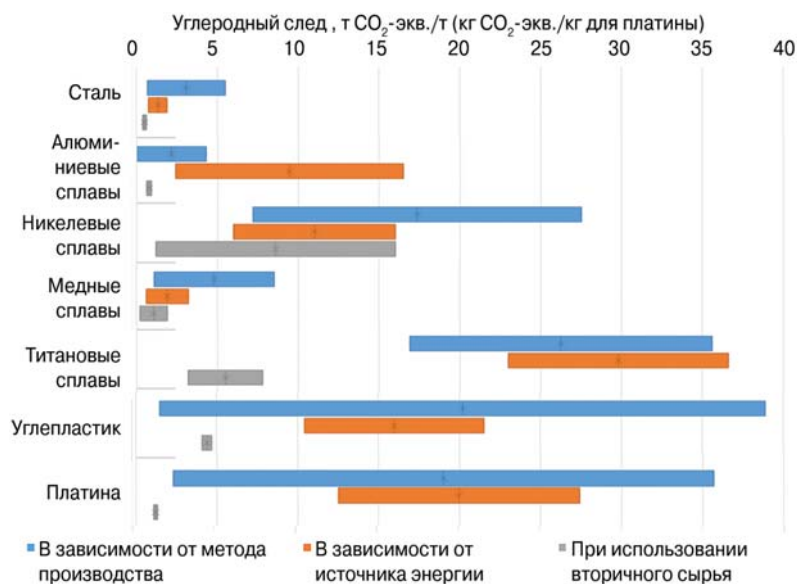


Рис. 1. Углеродный след основных конструкционных материалов, используемых в водородной энергетике [11, 12–15]

Fig. 1. Carbon footprint of the main construction materials used in hydrogen power engineering [11, 12–15]

родный след для этих материалов в среднем по миру. Это в большинстве случаев связано с использованием низкоуглеродных источников энергии (ГЭС, природный газ), усовершенствованными технологиями выплавки металлов и большим масштабом использования вторичного сырья при производстве стали. Высокое значение углеродного следа при производстве платины в сравнении с другими конструкционными материалами (выше в 1000 раз на тонну материала) связано с высоким потреблением электроэнергии при добыче и обогащении руды.

Для оценки углеродного следа при производстве основных конструкционных материалов были рассмотрены различные технологии производства, использование разных источников энергии и вторичного сырья (рис. 1).

По результатам оценки углеродного следа при производстве основных конструкционных материалов определено, что наибольший углеродный след имеет платина (2,3–35,6 кг CO₂-экв./т), углепластик (до 39,5 т CO₂-экв./т) и титановые сплавы (3,2–37,0 т CO₂-экв./т). Наименьший углеродный след при производстве имеют сталь (до

5,1 т CO₂-экв./т) и медные сплавы (до 8,5 т CO₂-экв./т).

Таким образом, углеродный след основных конструкционных материалов, используемых в водородной энергетике, может отразиться на углеродном следе всех этапов жизненного цикла водорода. Определено, что наибольшее влияние на углеродный след конструкционных материалов оказывает метод производства, количество и вид потребленной электрической энергии. Структура электрогенерирующих мощностей различных стран, а также различных регионов в пределах одной страны значительно отличаются друг от друга и зависят от климатических и географических условий,

Таблица 2. Углеродный след, т CO₂-экв./т, производства основных конструкционных материалов в мире и России [3]

Table 2. Carbon footprint, t CO₂eq/t, of production of main construction materials in the world and Russia [3]

Материал	В мире	В России
Сталь	1,6	1,4
Алюминий	12,5	4,0
Никель	13,0	8,1
Медь	3,7	5,7
Титан	18,5	н/д*
Платина	14750	21200
Углепластик	36,0	н/д*

*н/д – нет данных.

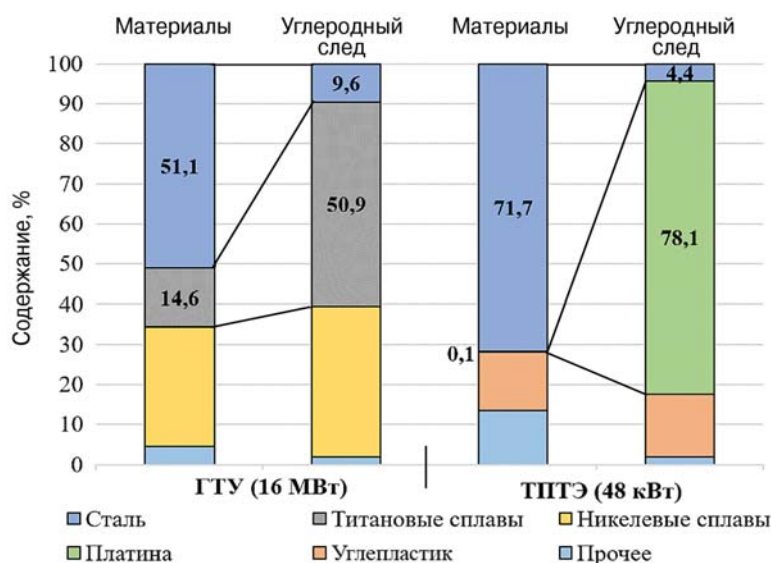


Рис. 2. Вклад конструкционных материалов в углеродный след производства устройств по использованию водорода

Fig. 2. Contribution of construction materials to the carbon footprint of production of hydrogen utilization plants

доступности топлива, природных ресурсов, уровня промышленного и технологического развития и др.

Углеродный след используемой электроэнергии для производства конструкционных материалов сказывается на результатах оценки углеродного следа производства устройств и систем, используемых в водородной энергетике. Использование электроэнергии, полученной из ВИЭ, для производства конструкционных материалов (например, "зеленая" сталь) будет иметь углеродный след намного ниже, чем при использовании энергии ископаемого топлива.

Для определения того, какой вклад конструкционные материалы вносят при производстве устройств по использованию водорода различной мощности и массой, была проведена оценка содержания конструкционных материалов и углеродного следа для газотурбинной установки (мощностью 16 МВт) и твердополимерного топливного элемента (мощностью 48 кВт), результаты представлены на рис. 2.

Проведенная оценка углеродного следа при производстве устройств по использованию водорода позволила определить вклад конструкционных материалов. При производстве газо-

турбинной установки основной вклад в углеродный след вносят титановые (50,9 %) и никелевые (37,6 %) сплавы, несмотря на то что более чем на 50 % ГТУ состоит из стали. Основным конструкционным материалом, используемым для производства ТПТЭ, является сталь (71,7 %), наименьшим по содержанию материалом является платина (0,1 %). Однако при производстве ТПТЭ основной вклад в углеродный след вносят платина (78,1 %) и углепластики (15,7 %) ввиду того, что имеют наибольший углеродный след на кг производимого материала.

Сравнивая ГТУ и ТПТЭ на 1 МВт установленной мощности, следует отметить, что углеродный след при производстве конструкционных материалов для топливного элемента выше (30 кг CO_2 -экв./МВт), чем для газовой турбины (0,11 кг CO_2 -экв./МВт). Это может быть связано с тем, что при производстве ГТУ используются конструкционные материалы с меньшим углеродным следом и ГТУ может вырабатывать большую электрическую мощность в сравнении с ТПТЭ на единицу массы конструкции.

Таким образом, для снижения углеродного следа устройств по использованию во-

дорода необходимо использовать исходные конструкционные материалы с наименьшим углеродным следом либо заменить на более экологичные конструкционные материалы.

Выводы

Водород является перспективным энергоресурсом с точки зрения декарбонизации промышленности и может быть использован в энергоносителях, таких как топливные элементы, двигатели внутреннего сгорания и газовые турбины, водородные энергетические установки для транспорта и энергетики. В водородной энергетике используется большое количество конструкционных материалов для производства оборудования, устройств и систем по получению, транспортированию, хранению и использованию водорода.

Выявленные аспекты жизненного цикла основных конструкционных материалов (сталь, алюминий, никель, медь, титан, платина, углепластики), используемых в водородной энергетике, позволили оценить их влияние на углеродный след. Оценка содержания конструкционных материалов и углеродного следа для устройств по использованию водорода показала, что при производстве ГТУ основной вклад в углеродный след оказывают титановые сплавы (50,9 %) и никелевые сплавы (37,6 %), при производстве ТПТЭ — платина (78,1 %) и углепластики (15,7 %), наименьшие по содержанию конструкционные материалы.

Декарбонизация производства конструкционных материалов, используемых на этапах жизненного цикла водорода, путем улавливания углекислого газа и использования ВИЭ имеет решающее значение для перехода стран к низкоуглеродной энергетике. Таким образом, более чистое производство конструкционных материалов приводит к снижению общих выбросов парниковых газов на этапах жизненного цикла водорода.

Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России, проект FSNM-2023-0004 "Водородная энергетика. Материалы и технология хранения, транспортировки и применения водорода и водородсодержащих смесей".

The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSNM-2023-0004 "Hydrogen energy. Materials and technology for storing, transporting and using hydrogen and hydrogen-containing mixtures").

Литература

1. Соснина Е.Н., Маслеева О.В., Крюков Е.В., Эрдили Н.И. Экологическая оценка жизненного цикла мини-ТЭЦ с различными типами двигателей. Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 4. С. 206–214.
2. Gulienetti A. Towards hydrogen transportation in gas transmission pipelines. Tesi Di Laurea Magistrale in Energy Engineering — Ingegneria Energetica, 2020. 155 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.politesi.polimi.it/retrieve/cb117ce4-c6cb-4566-aa4e-58211dd6f58a/2021_12_Gulienetti.pdf (дата обращения 13.01.2024).
3. Mozzhegorova Y., Ilinykh G., Korotaev V. Life Cycle Assessment of a Gas Turbine Installation. Energies. 2024. Vol. 17. P. 345.
4. Alamiery A. Advancements in materials for hydrogen production. A review of cutting-edge technologies. ChemPhysMater. 2024. Vol. 3. P. 64–73.
5. Baum Z.J., Diaz L.L., Konovalova T., Zhou Q.A. Materials Research Directions Toward a Green Hydrogen Economy. A Review. ACS Omega. 2022. Vol. 7. P. 32908–32935.
6. Quon W. A Compact and Efficient Steam Methane Reformer for Hydrogen Production. A Dissertation Presented to The Faculty of the Department of Chemical and Biomolecular, Engineering University of Houston. 2012. August. 432 p.
7. Kim M.-S., Lee T., Son Y., Park J., Kim M., Eun H., Park J.-W., Kim Y. Metallic Material Evaluation of Liquid Hydrogen Storage Tank for Marine Application Using a Tensile Cryostat for 20 K and Electrochemical Cell. Processes. 2022. Vol. 10. P. 2401.
8. Sustainability Indicators 2023 report. [Электронный ресурс]. URL: <https://worldsteel.org/steel-topics/sustainability/sustainability-indicators/> (дата обращения 19.01.2024).
9. Greenhouse Gas Emissions — Aluminium Sector. [Электронный ресурс]. URL: <https://international-aluminium.org/statistics/greenhouse-gas-emissions-aluminium-sector/> (дата обращения 27.09.2023).
10. Wei W. Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Nickel Products. Energies. 2020. Vol. 13(21). P. 5664.
11. Энциклопедия технологий 2.0: Производство металлов. Гл. ред. Д. О. Скобелев. ФГАУ "НИИ "ЦЭПП". М., СПб., Реноме, 2022. 378 с.
12. Nilsson A.E., Aragonés M.M., Arroyo F., Dunon V., Angel H., Komnitsas K., Willquist K. Review of the Carbon Footprint of Cu and Zn Production from Primary and Secondary Sources. Minerals. 2017. Vol. 7. P. 168.
13. Lyons R., Newell A., Ghadimi P., Papakostas N. Environmental impacts of conventional and additive manufacturing for the production of Ti-6Al-4V knee implant: A life cycle approach. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 112 (2). P. 787–801.
14. Hwang H., Kweon T., Kang H., Hwang Y. Resource and Greenhouse Gas Reduction Effects through Recycling of Platinum Containing Waste. Sustainability. 2024. Vol. 16. P. 80.
15. Kanemasu M., Nishimura W., Yoshikawa A., Yamamori T., Kobayashi R. Reduction of Environmental Impact by Recycling Waste Composite Material for Aircraft. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2018. Vol. 55. No. 2. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e552/e552040.pdf> (дата обращения: 10.02.2024).

References

1. Sosnina E.N., Masleeva O.V., Kryukov E.V., Erdili N.I. Ekologicheskaya otsenka zhiznennogo tsikla mini-TETs s razlichnymi tipami dvigatelei. Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. 2021. Vyp. 4. S. 206–214.
2. Gulienetti A. Towards hydrogen transportation in gas transmission pipelines. Tesi Di Laurea Magistrale in Energy Engineering — Ingegneria Energetica, 2020. 155 p. [Elektronnyi resurs]. URL: https://www.politesi.polimi.it/retrieve/cb117ce4-c6cb-4566-aa4e-58211dd6f58a/2021_12_Gulienetti.pdf (data obrashcheniya 13.01.2024).
3. Mozzhegorova Y., Ilinykh G., Korotaev V. Life Cycle Assessment of a Gas Turbine Installation. Energies. 2024. Vol. 17. P. 345.
4. Alamiery A. Advancements in materials for hydrogen production. A review of cutting-edge technologies. ChemPhysMater. 2024. Vol. 3. P. 64–73.
5. Baum Z.J., Diaz L.L., Konovalova T., Zhou Q.A. Materials Research Directions Toward a Green Hydrogen Economy. A Review. ACS Omega. 2022. Vol. 7. P. 32908–32935.
6. Quon W. A Compact and Efficient Steam Methane Reformer for Hydrogen Production. A Dissertation Presented to The Faculty of the Department of Chemical and Biomolecular, Engineering University of Houston. 2012. August. 432 p.
7. Kim M.-S., Lee T., Son Y., Park J., Kim M., Eun H., Park J.-W., Kim Y. Metallic Material Evaluation of Liquid Hydrogen Storage Tank for Marine Application Using a Tensile Cryostat for 20 K and Electrochemical Cell. Processes. 2022. Vol. 10. P. 2401.
8. Sustainability Indicators 2023 report. [Elektronnyi resurs]. URL: <https://worldsteel.org/steel-topics/sustainability/sustainability-indicators/> (data obrashcheniya 19.01.2024).
9. Greenhouse Gas Emissions — Aluminium Sector. [Elektronnyi resurs]. URL: <https://international-aluminium.org/statistics/greenhouse-gas-emissions-aluminium-sector/> (data obrashcheniya 27.09.2023).
10. Wei W. Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Nickel Products. Energies. 2020. Vol. 13(21). P. 5664.
11. Entsiklopediya tekhnologii 2.0: Proizvodstvo metallov. Gl. red. D. O. Skobelev. FGAU "NII "TsEPP". M., Spb., Renome, 2022. 378 s.
12. Nilsson A.E., Aragonés M.M., Arroyo F., Dunon V., Angel H., Komnitsas K., Willquist K. Review of the Carbon Footprint of Cu and Zn Production from Primary and Secondary Sources. Minerals. 2017. Vol. 7. P. 168.
13. Lyons R., Newell A., Ghadimi P., Papakostas N. Environmental impacts of conventional and additive manufacturing for the production of Ti-6Al-4V knee implant: A life cycle approach. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 112 (2). P. 787–801.
14. Hwang H., Kweon T., Kang H., Hwang Y. Resource and Greenhouse Gas Reduction Effects through Recycling of Platinum Containing Waste. Sustainability. 2024. Vol. 16. P. 80.
15. Kanemasu M., Nishimura W., Yoshikawa A., Yamamori T., Kobayashi R. Reduction of Environmental Impact by Recycling Waste Composite Material for Aircraft. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2018. Vol. 55. No. 2. [Elektronnyi resurs]. URL: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e552/e552040.pdf> (data obrashcheniya: 10.02.2024).

Ю.В. Мозжегорова – канд. техн. наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), e-mail: juliagubaha@mail.ru
 ● Г.В. Ильиных – канд. техн. наук, доцент, ПНИПУ, e-mail: galina.perm.59@yandex.ru ● В.Н. Коротаев – д-р техн. наук, профессор, ПНИПУ, e-mail: korotaev@pstu.ru

Yu.V. Mozzhegorova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University (PNRPU), e-mail: juliagubaha@mail.ru ● G.V. Ilinykh – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, PNRPU, e-mail: galina.perm.59@yandex.ru ● V.N. Korotaev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, PNRPU, e-mail: korotaev@pstu.ru