

А.Е. Ибраева

Международный университет «Астана», Астана Казахстан
(E-mail: aigerimibrayeva7@gmail.com)

«Экологическая устойчивость и перспективы водородной энергетики в Казахстане: глобальный опыт и тенденции»

Аннотация. Статья анализирует потенциал развития водородной энергетики в Казахстане, определена актуальность и перспективы данного направления. Выбран подход рассмотрения международного опыта и определения роли Казахстана на глобальном рынке водорода. При этом, учитываются основные мировые стимулы развития, такие как экологическая политика и прогнозируемый рост спроса на экологически чистый водород. Будучи самым маленьким элементом химической таблицы, водород требует особой технической и нормативной базы при производстве, хранении, транспортировке и применении, которые недостаточны в Казахстане на сегодняшний день. С другой стороны, имеющаяся нефтегазовая инфраструктура и значительный потенциал развития возобновляемых источников энергии в стране являются значительным преимуществом для начала работы. В условиях растущего глобального спроса на зеленый водород, Казахстан не только имеет возможность крупномасштабного производства для экспорта, но и сам нуждается в экологически чистом продукте для снижения выбросов углерода в энергетическом секторе и узконаправленной промышленности. При этом, в условиях повышенной вероятности водного дефицита и ряда серьезных технических ограничений в работе с водородом, развитие нового сектора экономики потребует поэтапного стратегического подхода.

Ключевые слова: водородная энергетика, альтернативные источники энергии, энергетическая промышленность, устойчивое развитие, экологическое равновесие.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6887/2023-144-3-101-118>

Поступила: 22.06.2022 / Принята к опубликованию: 10.08.2023

Введение

Глобальные задачи в области изменения климата были сформированы на основании международных научных исследований, признающих острую потребность в принятии мер для смягчения последствий и адаптации к изменению климата. В основе этих опасений лежит необходимость значительного сокращения антропогенных выбросов парниковых газов (ПГ), прежде всего углекислого газа (CO₂), метана (CH₄) и закиси азота (N₂O), которые являются основными факторами

глобального потепления. В 2020 году, большинство выбросов парниковых газов (ПГ) образовалось в результате сжигания ископаемого топлива для производства электроэнергии (39%). Выбросы парниковых газов удерживают тепло в атмосфере, что приводит к повышению глобальной температуры. В результате наблюдаются экстремальные погодные явления, повышение уровня моря, таяние ледников и нарушение экосистем, что представляет серьезную угрозу для человека [1].



Рисунок 1. Глобальные источники выбросов парниковых газов [2]

В свете повышения глобальных амбиций по борьбе с изменением климата, водород стал одним из ключевых факторов снижения углеродного следа широкого спектра видов деятельности, таких как энергетика, промышленность, транспорт и строительство. При использовании водорода образуется вода, что делает его экологически чистым энергоносителем, если он получен с помощью возобновляемых источников (зеленый) или из ископаемого топлива с улавливанием и хранением углерода (голубой) [3]. При этом, важно отметить, что водород не является единственным технологическим решением для снижения выбросов парниковых газов, перечисленных выше отраслей.

Водород обычно классифицируют по цветовому коду, связанному с методом его производства [3]:

- *Зеленый водород*: производится путем электролиза воды с использованием электроэнергии, вырабатываемой из возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как энергия ветра, солнца или гидроэлектроэнергии. Этот метод считается наиболее экологически чистым с точки зрения выбросов парниковых газов.

- *Голубой водород*: производится преимущественно из природного газа с помощью парового риформинга метана, но

связанные с процессом выбросы углерода улавливаются и хранятся или повторно используются, что сводит к минимуму воздействие на окружающую среду.

- *Серый водород*: производится из ископаемого топлива, обычно природного газа, с помощью парового риформинга метана без улавливания и хранения углерода. То есть, с выбросами парниковых газов.

- *Черный водород*: производится в результате газификации угля, процесса, при котором уголь превращается в водород, углекислый газ и другие побочные продукты. Как и серый водород, производство черного водорода также приводит к высоким выбросам парниковых газов в условиях отсутствия технологий улавливания и хранения углерода.

Страны, продемонстрировавшие значительные прогресс в борьбе с глобальным потеплением, активно развивают технологии получения и применения водорода. На сегодняшний день, ключевая роль водорода в снижении выбросов парниковых газов заключается в его универсальности – потенциале хранения энергии и применения в узконаправленных отраслях [4].

Согласно прогнозам Международного Энергетического Агентства [5], к 2050 году водород, полученный из низкоуглеродных

источников энергии, может обеспечить около 10% глобального энергетического спроса. При этом, в 2020 году доля потребления водорода в глобальном энергобалансе составила 0,1%. Ожидается, что к 2030 году это значение достигнет 2%.

Международный опыт использования водорода

Водород представляет собой универсальный, чистый и пригодный для хранения энергоноситель, имеющий множество применений для декарбонизации различных секторов. Страны с богатыми возобновляемыми ресурсами, такие как Австралия рассматривают возможность производства и экспорта зеленого водорода [6].

Однако текущие проблемы включают высокие производственные затраты (особенно для зеленого водорода), недостаточность инфраструктуры (такой как заправок станции и трубопроводы), проблемы безопасности и необходимость существенных технологических достижений для повышения эффективности и снижения затрат.

Ожидается, что в 2050 году, глобальное производство водорода достигнет 500 000 тонн в год, по сравнению с 90 000 тоннами в 2020 году. При этом, практически все производство будет реализовано методом электролиза с использованием ВИЭ) [5].

Многие страны и объединения, включая Европейский Союз (ЕС) усердно работают над использованием потенциала водорода, как одного из ключевых инструментов в достижении целей по энергопереходу и углеродной нейтральности. В этой главе будет рассмотрен опыт следующих стран наряду с ЕС: Австралии, Японии и Южной Кореи.

Европейский Союз

В рамках амбициозной «Зеленой сделки» и обязательств по достижению углеродной нейтральности к 2050 году, ЕС принял Стратегию по водороду (COM/2020/301) [7] в 2020 году. Стратегия предлагает 5 политических направлений: инвестиционная поддержка; поддержка

производства и спроса; создание рынка водорода и инфраструктуры; исследования и сотрудничество, а также международное сотрудничество. Согласно Внешней энергетической стратегии ЕС [8], «Европейская комиссия стремится заключить водородные партнерства с надежными странами-партнерами для обеспечения открытых торговых и инвестиционных отношений в области возобновляемых источников энергии и низкоуглеродных видов топлива».

Согласно Стратегии по водороду [7], ЕС стремится установить на своей территории не менее 40 ГВт электролизеров возобновляемого водорода и еще 40 ГВт за пределами ЕС для экспорта. Внутреннее производство зеленого водорода должно достичь 10 миллионов тонн зеленого водорода к 2030 году. В период с 2030 по 2050 год, технологии использования зеленого водорода должны достичь зрелости и быть внедрены в широких масштабах, чтобы охватить все сектора, где другие альтернативы могут оказаться неосуществимыми или иметь более высокие затраты.

Для того чтобы промышленный спрос постепенно охватывал новые области применения, включая производство стали, грузовые автомобили, железнодорожный, морской и другие виды транспорта, ЕС будет проводить целенаправленную работу на формирование стабильного спроса. Возобновляемый водород начнет играть важную роль в балансировании системы электроснабжения, основанной на возобновляемых источниках энергии, путем преобразования электроэнергии в водород, когда возобновляемая электроэнергия будет в изобилии и дешевой. Водород также будет использоваться для ежедневного или сезонного хранения, в качестве резервного источника, повышая надежность поставок энергии.

При этом, косвенное влияние на развитие низкоуглеродных технологий влияет инновационная политика ЕС – Механизм пограничного углеродного налога (Carbon Border Adjustment Mechanism или CBAM), который вступит в силу 1 октября 2023 в виде переходной

фазы [9]. В рамках данного механизма, импортерам из ЕС (в том числе товаров из Казахстана) будет выгоднее приобретать продукцию с более низким углеродным следом. Таким образом, импортеры цемента, железа и стали, алюминия, удобрений, электроэнергии и водорода получат экономический стимул для внедрения низкоуглеродных технологий, в том числе зеленого и голубого водорода.

Австралия

Как страна, владеющая обширными территориями и соответственно большим потенциалом производства возобновляемой электроэнергии, в 2019 году Австралия разработала Национальную водородную стратегию, в рамках которой к 2030 году Австралия планирует стать крупным мировым игроком в индустрии чистого водорода для обезуглероживания внутренней промышленности и экспорта [6].

Начиная с 2025 года, Стратегия предусматривает широкомасштабную активизацию рынка. На этом этапе предполагается строительство инфраструктуры: резервуары для хранения, заправочные станции, порты, дороги, железнодорожные пути и другие объекты для снабжения водородом. Однако, Стратегия не отражает четкие количественные цели по производству водорода.

Согласно S&P Global [10] Правительство Австралии инвестировало 811 миллионов USD в финансирование водородных проектов и исследований. При этом, несколько пилотных, демонстрационных и мелкомасштабных проектов находятся на различных стадиях реализации.

Япония

Япония, учитывая ее ограниченные внутренние энергетические ресурсы, была одной из первых стран, внедривших Базовую водородную стратегию [11], чтобы уменьшить свою зависимость от импорта энергии и достичь углеродной нейтральности. Цель Стратегии - увеличить поставки водорода до 3 миллионов тонн в 2030 году (по сравнению с 2 миллионами

тонн в 2020 году), 12 миллионов тонн в год к 2040 году и 20 миллионов тонн в 2050 году.

Тем не менее Япония имеет ряд проблем. Например, потребуется расширить сферу применения, включив в нее корабли, поезда, грузовики и другие виды транспорта, а также создать повсеместную водородную экосистему. Также важно построить глобальную цепочку поставок собственных хранилищ. Поскольку водородная стратегия является долгосрочной, крайне важно поддерживать исследования и разработки, в том числе путем стратегического развития человеческого ресурса [12].

Южная Корея

В 2019 году Корея объявила о создании Дорожной карты по водородной экономике [13], которая нацелена на внедрение 15 ГВт коммунальных и 2,1 ГВт коммерческих и бытовых топливных элементов к 2040 году. В этом же году ожидается около 5,9 миллионов автомобилей и 60 000 автобусов на топливных элементах, которые будут обслуживаться 1 200 водородными заправочными станциями.

Водородная экономика имеет ключевое стратегическое значение для Кореи, испытывающей недостаток как в традиционных, так и в возобновляемых источниках энергии. В производстве промышленных газов долгое время доминировали японские, американские и европейские технологии и стандарты. Поскольку водород начинает играть все более важную роль в глобальной экономике, Корея стремится усилить своё влияние в этой области.

По прогнозам, водородная промышленность Кореи увеличится почти вдвое - с 10,5 млрд EUR в 2020 году до 20 млрд EUR к 2030 году. Этот рост будет обеспечен инвестициями крупных местных компаний, которые рассматривают водород в качестве ключевого двигателя роста. Пять крупнейших корейских конгломератов – Hyundai Motors, SK, POSCO, Hanwha и Hyosung – недавно объявили об инвестициях в водородную экономику на сумму 31,5 млрд EUR к 2030 году [14].

Экологическая политика Казахстана

Развитие водородной политики Казахстана обусловлено экологическими усилиями страны по энергетическому переходу, зеленой трансформацией и стремительным ростом спроса на зеленый водород в мире. Данная глава рассмотрит, как развитие экологической политики Казахстана постепенно стимулирует развитие внутреннего водородного рынка.

В 2009 году, был принят инновационный Закон о поддержке использования возобновляемых источников энергии [15], который отразил основные понятия, ввел государственное регулирование и инструмент поддержки развития ВИЭ в стране, основанный на внедрении централизованной покупки единым закупщиком. Наряду с этим, было создано ТОО «Расчетно-финансовый центр по поддержке возобновляемых источников энергии» (РФЦ), определенное в качестве единого закупщика возобновляемой электроэнергии [16].

В 2013 году, Казахстан предпринял первый значительный шаг в развитии экологической политики путем принятия Концепции по переходу Республики Казахстан в «зеленой экономике» [17]. Концепция отразила основные долгосрочные цели страны, такие как обеспечение населения доступом к питьевой воде, повышение энергоэффективности на 50% к 2050 году, повышение доли альтернативных источников в выработке электроэнергии до 50% к 2050 году, повышение доли перерабатываемых отходов до 50% к 2050 году, газификация регионов Казахстана и т.д.

В 2013 году в Казахстане начала работать первая в Центральной Азии система торговли выбросами (СТВ), в рамках которой крупные установки, выбрасывающие углекислый газ, облагаются обязательствами по участию в углеродном рынке. В 2020 году, СТВ покрывала 47% выбросов страны, а средняя цена на углерод достигла 563 тенге за тонну [18].

В 2016 году Казахстан подписал Парижское соглашение по изменению

климата, в рамках которого принял обязательство по сокращению выбросов парниковых газов на 15% до 2030 года относительно выбросов 1990 года (Указ Президента Республики Казахстан от 20 июля 2016 года № 301) [19].

В 2018 году был введен механизм аукционных торгов по отбору проектов ВИЭ, пришедший взамен действующему механизму фиксированных тарифов. Аукционные торги проходят ежегодно с 2018 года, с целью отбора проектов с наименьшим тарифом на электроэнергию [20]. Общее количество мощности, выставяемой на торгах, определяется Министерством энергетики Республики Казахстан в соответствии с установленными целями по повышению доли ВИЭ в энергобалансе [21]. АО «KOREM» определено организатором аукционных торгов (Приказ и.о. Министра энергетики от 7 августа 2017 года №280) [22].

В декабре 2020 года, на саммите климатических амбиций Президент Казахстана, Касым-Жомарт Токаев, объявил о достижении углеродной нейтральности Казахстана к 2060 году [23]. В 2021 году была представлена Доктрина Казахстана по достижению углеродной нейтральности к 2060 году [24]. В феврале 2023 года, Казахстан принял Стратегию достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года (далее - Стратегия) – ключевой документ, отражающий долгосрочное направление экономического, экологического и социального развития страны (Указ Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 года № 121) [25].

Учитывая, что в Казахстане в 2020 году около 78% всех выбросов парниковых газов приходились на энергетический сектор, Стратегия делает основной акцент на энергопереход. Следовательно, водород признается одним из ключевых инструментов в замещении топлива. Согласно Стратегии: - «Конечный спрос будет смещаться в сторону использования низкоуглеродных видов топлива (биотопливо и водород) в тех областях, где переход на электричество все еще затруднен. В связи с этим будет разработано долгосрочное видение по развитию водородной энергетики». При

этом, также рассматривается развитие водорода в промышленном и транспортном секторах.

Производство водорода

По состоянию на конец 2021 года почти 47% мирового производства водорода приходилось на природный газ и только около 4% на электролиз. В 2021 году среднемировая доля возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии составляла около 33%, из чего следует предположение, что

только около 1% мирового производства водорода производится с использованием возобновляемых источников энергии. Электролитический водород от специализированного производства по-прежнему использовался только в демонстрационных проектах, общая мощность которых в 2021 году составила 0,7 ГВт. При этом, по прогнозам к 2050 году рост мощности производства зеленого водорода достигнет 4-5 ТВт, что потребует более высоких темпов развития солнечной и ветровой энергетики [26].

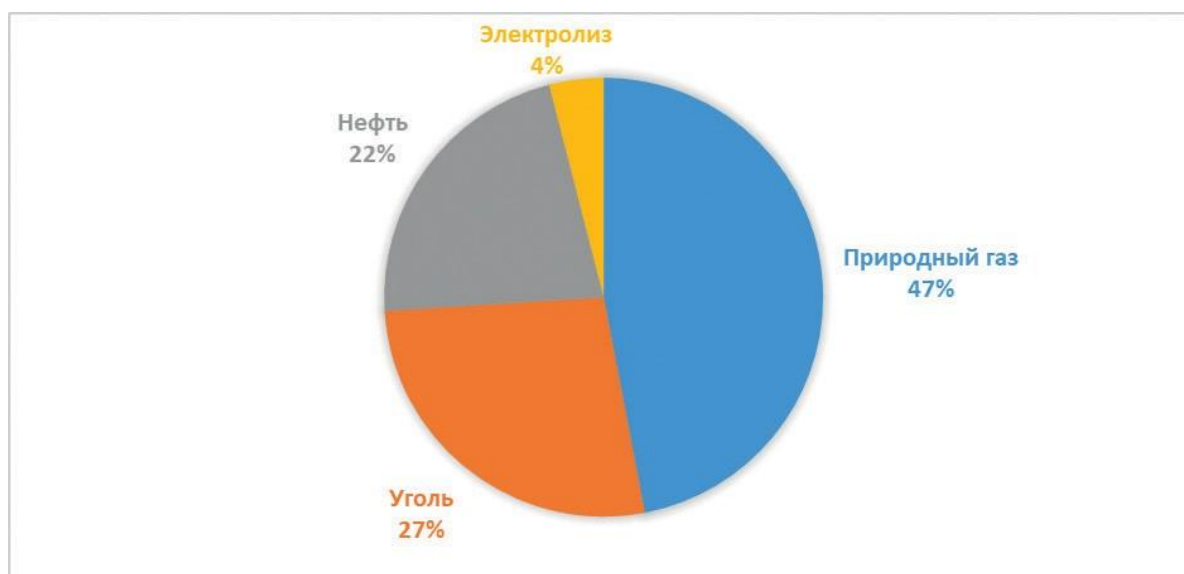


Рисунок 2. Производство водорода по источнику, 2021 [26]

Несмотря на то, что Водород является крайне распространенным элементом, он не встречается в природе в виде газа. Двумя основными видами сырья для производства чистого газообразного водорода являются вода и углеводороды, преимущественно природный газ.

Паровой риформинг метана

Ключевым процессом производства водорода из природного газа является паровой риформинг метана. Высокотемпературный пар (700°C-1000°C) используется для получения водорода из источника метана, такого как природный газ. При паровом риформинге, метан реагирует с водяным паром под давлением 0,3-25 МПа в присутствии катализатора

с образованием водорода, монооксида углерода и относительно небольшого количества диоксида углерода посредством реакции воды с газом [27].

Если углерод, образованный в результате данной реакции, улавливается, а затем захороняется или используется, то полученный водород считается «голубым». В противном случае, водород считается «серым», то есть не экологичным. В Казахстане преимущественно производится серый водород ввиду отсутствия технологий улавливания и хранения углерода.

Электролиз воды

Электролиз воды является одним из методов электрохимического расщепления

воды для производства водорода и кислорода с помощью электричества. Основная реакция электролиза воды отражена в формуле 3 [28].

Существует несколько типов электролизеров, которые состоят из анода и катода, разделенных электролитом. Различные электролизеры функционируют по-разному, в основном в силу использования разных электролитических материалов и ионных соединений [29]. Если в процессе используется электроэнергия из возобновляемых источников, то полученный водород считается «зеленым».

Транспортировка и хранение водорода

Водород транспортируется в газообразном и жидком состояниях авиа, авто и железнодорожными перевозками для более коротких дистанций с умеренным спросом, и трубопроводом или морскими перевозками для более крупных объемов и длинных дистанций.

Подобно природному газу, водород транспортируется по трубопроводам. Трубопровод обычно является наиболее экономичным для больших объемов на средние и большие расстояния, однако, требует значительных капитальных затрат для переназначения трубопроводов природного газа или строительства новых. Важно отметить, что небольшой молекулярный размер водорода и высокая реакционная способность могут привести к охрупчиванию некоторых материалов трубопроводов, что повышает сложность технической модернизации трубопроводов природного газа [30].

Перемещение водорода между хранилищами и транспортными средствами (такими как трубопроводы, грузовики или корабли) является важной частью цепочки поставок водорода. Обычно данный процесс ассоциируется с перекачкой или сжатием водорода до требуемого давления, затратами энергии для сжатия или охлаждения, потенциальными потерями водорода при передаче и необходимостью в системах безопасности для предотвращения утечек или избыточного давления. Основным риском являются потенциальные утечки

водорода, которые могут привести к взрыву или пожару из-за широкого диапазона воспламеняемости водорода при соединении с кислородом - от 4 до 74% к объему воздуха, для природного газа это значение намного меньше 5,3 - 15% [31].

Водород хранится следующими методами:

- *Сжатый газ:* водород сжимается и хранится под давлением в специально разработанных резервуарах. Это наиболее распространенная и дешевая форма хранения водорода для небольших объемов.

- *Жидкий водород:* водород можно охладить до чрезвычайно низких температур (-253°C в резервуарах высокого давления) и хранить в виде жидкости в изолированных, термозащищенных резервуарах. Это обеспечивает более компактное хранение, но требует значительного количества энергии (около 30% энергии, содержащейся в водороде) для сжижения и поддержания низких температур, что увеличивает стоимость и сложность [32].

- *Металлогидридные накопители:* некоторые материалы могут поглощать атомы водорода в своей атомной структуре, а затем высвобождать их, когда это необходимо. Данные технологии находятся на более ранней стадии исследований и связаны с проблемами эффективности, стоимости и доступности материалов.

- *Подземное хранилище:* как и природный газ, водород можно хранить под землей в соляных пещерах, истощенных нефтяных или газовых месторождениях. Данный метод подходит для длительного хранения большого количества водорода, однако, требует наличия подходящих геологических формаций.

С точки зрения цены хранения водорода, сжатие газообразного водорода и использование подземных хранилищ являются наиболее экономичными, когда сжижение – наименее [33].

Технические требования, ключевые термины и определения касательно основных методов транспортировки и хранения, требуемого оборудования, требований безопасности к работе с оборудованием и т.д. отражены в технических стандартах, разрабатываемых следующими техническими комитетами по

стандартизации: ISO/TC 197 – Водородные технологии и IEC 105 – Технологии топливных элементов. В Казахстане, разработкой данных стандартов занимается Республиканское государственное предприятие «Казахстанский институт стандартизации и метрологии» Комитета технического регулирования и метрологии Министерства торговли и интеграции Республики Казахстан и Технический комитет № 117 «Возобновляемые источники энергии и альтернативная энергетика».

В случае Казахстана, учитывая его обширную территорию и потенциально широко распространенные места производства и использования водорода, создание эффективной и безопасной инфраструктуры транспортировки и хранения водорода потребует значительных усилий. В дополнение, необходимо внедрение нормативной базы, стандартов безопасности и обучение персонала.

Применение водорода

Стоит учитывать, что водород также применяется в меньших масштабах в области строительства, производства синтетического топлива и др.

Энергетический сектор. Водород используется в качестве чистого или смешанного топлива для производства электроэнергии, в турбинах внутреннего сгорания или топливных элементах, которые преобразуют химическую энергию водорода в электричество. Элемент также используется для хранения энергии, выступая в качестве буфера для балансировки спроса и предложения в электросетях в условиях наличия непостоянной возобновляемой энергии (солнце или ветер), что особенно актуально для энергетических сетей и развития ВИЭ в Казахстане.

Промышленность. Водород часто рассматривается в качестве восстановителя в металлургии, что может значительно уменьшить углеродный след процессов, традиционно связанных с крупными выбросами CO₂. Это наиболее интересно для Казахстанской металлургии, особенно в условиях принятия СВМ.

Водород также широко используется на нефтеперерабатывающих заводах для удаления примесей из сырой нефти и в химической промышленности, особенно в производстве аммиака и метанола.

Транспорт

В качестве низкоуглеродного топлива водород имеет потенциальное применение во всех видах транспорта. Транспортные средства на топливных элементах, включая автомобили, автобусы и грузовики, а также корабли и даже самолеты, разрабатываются и испытываются.

Транспортные средства на топливных элементах считаются многообещающей технологией из-за их высокой эффективности и отсутствия выбросов выхлопных газов. В настоящее время основной проблемой является высокая стоимость топливных элементов и систем хранения водорода, хотя ожидается, что данные затраты снизятся благодаря технологическому прогрессу и увеличению масштаба использования водорода. Для применения топливных элементов в транспорте также требуется сеть водородных заправочных станций, которой до сих пор нет в большинстве стран, включая Казахстан [34].

Во всех вышеперечисленных применениях основными проблемами являются высокая стоимость производства водорода и инфраструктуры, а также необходимость технологического прогресса и масштабирования для снижения затрат. Экономическая жизнеспособность будет зависеть от будущих цен на ископаемое топливо и углерод, а также от государственной политики и правил, поддерживающих использование водорода.

Потенциала развития водорода в Казахстане

Доступность сырья для производства водорода во многом зависит от местных ресурсов. Страны со значительными запасами имеют преимущество в производстве серого и голубого водорода, а для производства зеленого водорода преимущество имеют страны с высоким потенциалом возобновляемых источников

энергии. Казахстан имеет доступ к запасам углеводородов и обладает обширными территориями для размещения объектов ВИЭ.

Техническая готовность страны к крупномасштабному производству водорода в настоящее время ограничена. В стране недостаток опыта работы с такими технологиями, как электролиз, улавливание и хранение углерода, обученного персонала и технических стандартов. Кроме того, сектор возобновляемых источников энергии, который должен стать основным источником электричества для производства зеленого водорода, начал стремительное развитие относительно недавно. В 2022 году, доля ВИЭ в выработке электроэнергии Казахстана составила 4,53% или 5,11 млрд.кВтч [21]. В этой связи, сектор ВИЭ должен значительно расширяться, чтобы обеспечить необходимые ресурсы для крупномасштабного производства водорода.

Данная глава рассмотрит текущие инициативы в области водорода в Казахстане, возможности применения, потенциал производства голубого и зеленого водорода, на которые прогнозируется значительный рост спроса.

Текущие инициативы

10 июня 2021 года на 33-м пленарном заседании Совета иностранных инвесторов, Президент РК, Касым-Жомарт Токаев, поручил Министерству энергетики и АО НК «КазМунайГаз» развивать водородную энергетику [35]. В этой связи, в апреле 2022 года был создан Центр компетенций по водородной энергетике при ТОО «КМГ ИНЖИНИРИНГ», который проводит исследования в области водородных технологий совместно с местными университетами и научно-исследовательскими институтами для реализации проектов по производству, хранению, транспортировке и применению водорода, а также решений улавливания, хранения и использования углерода [36]. Деятельность Центра направлена, в первую очередь, на проведение комплексного анализа водородных технологий с

целью развития системы водородной энергетики [37].

В октябре 2021 года, АО НК «КазМунайГаз» подписало два меморандума: с ТОО «Эр Ликид Мунай Тех Газы» (подразделение Air Liquide) по развитию водородных инициатив в транспортном секторе, в частности по установке водородной заправочной станции для автомобилей на топливных элементах; и Linde в части изучения производства водорода и аммиака с использованием природного газа в качестве сырья и электролиза воды для получения голубого и зеленого водорода соответственно.

Важно отметить, что в настоящее время водород производится на одном заводе по производству аммиака и двух нефтеперерабатывающих заводах АО НК «КазМунайГаз» для удаления примесей из сырой нефти на месте, без транспортировки [36]. Во всех случаях используется серый водород. Однако, АО НК «КазМунайГаз» планирует освоение технологий улавливания и хранения углерода, которые откроют доступ к производству голубого водорода [38].

24 сентября 2022 года, ТОО «Green Spark Limited» провело торжественное мероприятие с демонстрацией производства первой молекулы зеленого водорода в Казахстане. Приобретенный компанией электролизер производит зеленый водород в малых масштабах с помощью энергии небольшой солнечной электростанции мощностью в 22 кВт. Данный электролизер также используется научным сообществом Казахстана для освоения водородных технологий.

В Казахстане ведется работа по реализации амбициозного проекта немецко-шведской фирмы Svevind, в рамках которого ожидается строительство 40 ГВт мощности ВИЭ для производства 2 миллионов тонн зеленого водорода в год. Цель производства – экспорт в ЕС [39].

Кроме того, 1 июля 2023 года был принят первый национальный стандарт, фокусирующийся на применении водородных технологий, СТ РК ISO 19880-1 «Водород газообразный. Заправочные станции» [40]. В соответствии с

Национальным планом по стандартизации на 2023 год [41], в 2024 году ожидается принятие ещё шести стандартов в области водорода. Разработка данных стандартов была инициирована ТК 117 «Возобновляемые источники энергии и альтернативная энергетика», созданным на базе ОЮЛ «Казахстанская ассоциация региональных экологических инициатив «ЕСОJER».

Применение водорода в Казахстане

Как упоминалось выше, стимулирование развития сектора водорода в Казахстане обусловлено прогнозируемым ростом глобального спроса на зеленый водород, вызванного целями по снижению выбросов углерода (с точки зрения производства зеленого водорода для экспорта), амбициями страны по достижению углеродной нейтральности и введением СВAM (для обезуглероживания местного производства).

Энергетический сектор Казахстана в настоящее время тесно связан с использованием угля. В 2020 году на основе сжигания угля было произведено 68,9 % электроэнергии и 99 % теплоэнергии.

Стремительный рост доли возобновляемых источников энергии создает дисбаланс в сети, связанный с непостоянностью выработки энергии солнца или ветра. В результате, традиционные источники энергии вынуждены ежедневно варьировать количество вырабатываемой электроэнергии в зависимости от погодных условий. Данная проблема может быть решена использованием водорода в качестве топлива или накопителя для балансировки сети. Важно отметить, что альтернативные методы балансировки сети, такие как установка литий-ионных аккумуляторов или строительство гидроаккумулирующих станций сопряжены с высокими капитальными затратами.

С помощью водорода возможна частичная декарбонизация производства стали, химических продуктов, цемента и транспортного сектора (автомобильного и железнодорожного). Кроме того, развитие водородной промышленности может

привести к технологическим достижениям и новым рабочим местам.

Производство голубого водорода тесно связано с развитием нефтегазового сектора страны. Как упоминалось ранее, без применения дорогостоящих технологий улавливания и хранения углерода, производство голубого водорода невозможно. В условиях текущих цен на углерод (около 1 EUR в Казахстане по сравнению с более 90 EUR в ЕС) [42], технологии улавливания и хранения углерода не являются рентабельными, что ограничивает их приобретение. Однако, согласно Стратегии достижения углеродной нейтральности Казахстана до 2060 года, ожидается снижение бесплатно распределяемых квот на углерод и соответственно увеличение цены. В дополнение, в 2024-2025 годах, АО НК «КазМунайГаз» планирует исследование и проектирование пилотного проекта по внедрению технологий улавливания и хранения углерода [38].

Тем не менее, нефтегазовый сектор Казахстана может сыграть ключевую роль в водородной экономике не только с точки зрения возможности производства голубого водорода. В стране имеется разветвленная сеть трубопроводов, которая при модификации может быть использована для транспортировки водорода. Кроме того, истощенные нефтяные и газовые месторождения могут быть использованы для долгосрочного хранения крупных объемов водорода. С другой стороны, обширные территории страны и отдаленные производственные площадки являются ограничением для транспортировки водорода, поскольку элемент требует особых методов обращения и хранения.

Важно отметить огромный потенциал Казахстана в выработке возобновляемой энергии, особенно энергии ветра и солнца (1,8 трлн кВт*ч в год [43] и 2,5 млрд кВт*ч в год [44] соответственно). Учитывая, что для производства 1 килограмма водорода методом электролиза требуется около 48 кВт*ч электроэнергии [45], а прогнозируемый глобальный спрос на низкоуглеродный водород к 2050

достигнет 520 миллионов тонн в год [46], то теоретически, Казахстан может удовлетворить 7,2% глобального спроса на зеленый водород в 2050 году. Однако, в отличие таких стран как Австралия, Казахстан не имеет доступа к открытому морю, что ограничивает доступ к водным ресурсам для крупномасштабного производства зеленого водорода.

Предлагается провести предварительный расчет потребления воды для производства зеленого водорода на примере вышеупомянутого проекта Svevind. Согласно формуле 3, опираясь на атомную массу, для производства одного килограмма водорода требуется 9 килограмм дистиллированной воды. Соответственно, для производства 2 миллионов тонн водорода потребуется 18 миллионов тонн воды ежегодно, что эквивалентно удельной водообеспеченности 6 000 граждан Казахстана в год [47] или 0,02% от общего объема воды Каспийского моря [48].

С другой стороны, в Казахстане наблюдается сокращение водных ресурсов. Согласно Министерству экологии и природных ресурсов РК, в 2023 году объем речного стока сократился на 17% по сравнению с данными 2000-х годов [49]. Согласно прогнозам Всемирного Банка [50], объем водных ресурсов Казахстана сократится еще на 15% к 2030 году. Основными причинами снижения объема в Казахстане являются увеличение забора воды из трансграничных рек, изношенность инфраструктуры, отступление ледников и повышение потребления воды для орошения и по причине роста населения [49][51][52]. В этой связи, при рассмотрении возможности увеличения доли производства зеленого водорода в Казахстане, важно учитывать доступность водных ресурсов, так как решая одну экологическую проблему, существует риск создания новой.

Выводы

Казахстан имеет значительный потенциал для развития сферы экологически чистого водорода, как с

точки зрения возможности развития ВИЭ благодаря обширной территории, так и наличия ископаемого топлива и транспортной инфраструктуры. При этом, имеются существенные технологические ограничения в виде отсутствия технологий улавливания и хранения водорода, недостаточного развития возобновляемой энергетики и дефицит опытных кадров. В дополнение, в условиях повышенной вероятности водного дефицита в стране, присутствует явный экологический риск, связанный с развитием крупномасштабного производства зеленого водорода для экспорта.

Важным политическим решением в развитии водородной стратегии Казахстана является определение приоритетного типа водорода. Зеленый водород, полученный методом электролиза воды с помощью возобновляемых источников энергии, является наиболее перспективным в долгосрочном периоде. Это касается производства и потребления внутри страны с целью снижения углеродного следа в энергетическом, промышленном и транспортном секторах. При этом, значительный потенциал развития ВИЭ создает возможность для экспорта водорода в другие страны, что согласуется с международными климатическими политиками и стратегиями. Например, ЕС планирует приобретать значительное количество зеленого водорода за пределами своих границ.

Однако в краткосрочной и среднесрочной перспективе рекомендуется сфокусироваться на развитии голубого водорода. Это связано с более низкими ценами производства и хранения (в истощенных месторождениях), наличием нефтегазовой инфраструктуры. Данный подход позволит получить критически важный опыт в области транспортировки и хранения водорода.

Для транспортировки водорода в Европу и Азию из Казахстана, следует рассмотреть использование трубопроводов, которые могут быть жизнеспособным решением при условии модернизации для водорода. При этом требуются значительные первоначальные инвестиции,

но эксплуатационные расходы будут относительно низкими.

Нехватка воды представляет собой серьезную проблему для крупномасштабного производства зеленого водорода, так как экспорт зеленого водорода в больших количествах может истощить водные ресурсы страны. Успешное совершенствование водной инфраструктуры, внедрение технологий повторного использования воды для граждан и промышленных предприятий, экономное использование воды в сельском хозяйстве имеет прямое отношение к развитию сектора зеленого водорода.

В то время как нехватка воды является экологическим риском для производства водорода, важно учитывать ключевые технологические ограничения, такие как доступность технологий, требования к инфраструктуре транспортировки и хранения, разработку технических стандартов, недостаточную квалификацию рабочей силы. С другой стороны, развитие водорода ассоциируется с такими возможностями, как создание рабочих мест,

диверсификация энергетики, сокращение выбросов углерода и позиционирование Казахстана в качестве лидера на развивающемся мировом рынке.

Развитие водорода в Казахстане представляет собой явную возможность для продвижения к устойчивому будущему. Очевидны экономические, экологические, социальные и технологические выгоды. Тем не менее, данный путь сопряжен со сложностями, требующими стратегического подхода и тесного сотрудничества государства, промышленности и экологического сообщества страны.

Финансирование

Статья подготовлена по результатам исследований, финансируемых Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19175789 «Развитие водородной энергетики в Казахстане и международная энергетическая безопасность: опыт стран Европейского Союза»).

Список литературы

1. The Effects of Climate Change [Электрон.ресурс]. – 2021. – URL: <https://climate.nasa.gov/effects/> (дата обращения: 18.05.2023).
2. Global energy-related CO2 emissions by sector [Электрон.ресурс]-2020. -URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-related-co2-emissions-by-sector> (дата обращения 22.07.2020).
3. Марчант Н. Серый, синий, зеленый – почему существует так много цветов водорода? -Всемирный экономический форум, [Электрон.ресурс]. – 2021. – URL: <https://www.weforum.org/agenda/2021/07/clean-energy-green-hydrogen/> (дата обращения: 19.06.2023).
4. The Future of Hydrogen Report prepared by the IEA for the G20, Japan Seizing today's opportunities [Электрон.ресурс]-2021. -URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (дата обращения 15.03.2022) [Электрон.ресурс]. – 2021. – URL: [Электрон.ресурс]-2021. -URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5bd46d7b-906a-4429-abda-e9c507a62341/GlobalHydrogenReview2021.pdf> (дата обращения: 07.04.2021).
5. State of Hydrogen [Электрон.ресурс]. – 2022. – URL: <https://www.dcceew.gov.au/energy/publications/australias-national-hydrogen-strategy> (дата обращения: 18.01.2019).
6. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe [Электрон.ресурс]. – 2021. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2020%3A301%3AFIN> (дата обращения: 12.02.2023)
7. Carbon Border Adjustment Mechanism [Электрон.ресурс]. – 2022. – URL: https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en (дата обращения 24.03.2023).
8. Синх Р. Австралия пересмотрит и обновит свою водородную стратегию на 2019 год: министр – S&P Global, [Электрон.ресурс]. – 2021. – URL: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/022423-australia-to-revise-renew-its-2019-hydrogen->

strategy-minister#:~:text=The%20National%20Hydrogen%20Strategy%20says,chains%20for%20prospective%20hydrogen%20hubs. (дата обращения: 29.05.2023).

9. Basic Hydrogen Strategy [Электрон.ресурс]. – 2021. – URL: https://cdn.climatepolicyradar.org/navigator/JPN/2017/basic-hydrogen-strategy-2017_c662e8efd1b8e5b70577b8a23cd97192.pdf (дата обращения: 2017).

10. Tapping Hydrogen's Energy Potential [Электрон.ресурс]. – 2021. – URL: https://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/global_warming/roadmap/innovation/therp.html (дата обращения: 17.07.2018).

11. Hydrogen RD&D Collaboration Opportunities: The Republic of Korea [Электрон.ресурс]. – 2021. – URL: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_551e67dca75340569e68e37eea18f28e.pdf (дата обращения: 28.01.2022).

12. Outlook on Hydrogen Economy & Roadmap [Электрон.ресурс]. – 2021. – URL: <https://icdk.dk/-/media/websites/icdk/locations-reports/seoul/outlook-on-korean-hydrogen-economy-and-roadmap.ashx> (дата обращения: 28.01.2022)

13. О поддержке использования возобновляемых источников энергии [Электрон.ресурс]. – 2019. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z090000165_ (дата обращения: 25.08.2020).

14. [Электрон.ресурс]-2022. <https://www.rfc.kz/about> (дата обращения 20.09.2022)

15. О Концепции по переходу Республики Казахстан к «зеленой экономике» [Электрон.ресурс]. – 2019. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U1300000577> (дата обращения: 15.08.2022).

16. Kazakhstan Emissions Trading System» [Электрон.ресурс]. – 2018. – URL: <https://icapcarbonaction.com/en/ets/kazakhstan-emissions-trading-system> (дата обращения: 12.02.2021).

17. “О подписании Парижского соглашения” [Электрон.ресурс]. – 2016. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U1600000301> (дата обращения: 12.02.2021).

18. Аукционные торги ВИЭ 2023 [Электрон.ресурс]. – 2023. – URL: <https://vie.korem.kz/> (дата обращения: 28.05.2023).

19. Жаңартылатын энергия көздерін дамыту [Электрон.ресурс]. – 2023. – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo/activities/4910?lang=ru> (дата обращения: 01.02.2023).

20. [Электрон.ресурс]. – 2023. – URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=35734706 (дата обращения: 02.01.2020).

21. Сатубальдина А. Токаев заявляет о намерении Казахстана достичь углеродной нейтральности – EuReporter, [Электрон.ресурс]. – 2023. – URL: <https://ru.eureporter.co/frontpage/2020/12/16/tokayev-announces-kazakhstans-pledge-to-reach-carbon-neutrality-by-2060/> (дата обращения: 02.01.2020).

22. Видение Казахстана по достижению углеродной нейтральности представлено на встрече высокого уровня в г. Нур-Султан [Электрон.ресурс]. – 2023. – URL: <https://www.undp.org/ru/kazakhstan/news/видение-казахстана-по-достижению-углеродной-нейтральности-представлено-на-встрече-высокого-уровня-в-г-нур-султан> (дата обращения: 13.10.2019).

23. Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года [Электрон.ресурс]. – 2023. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121> (дата обращения: 19.10.2022).

24. Energy transition [Электрон.ресурс]. – 2023. – URL: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen> (дата обращения 19.08.2023).

25. Hydrogen Production: Natural Gas Reforming [Электрон.ресурс]. – 2023. – URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming#:~:text=In%20steam-methane%20reforming%2C%20methane,for%20the%20reaction%20to%20proceed> (дата обращение 12.02.2021).

26. Кумар С.С. и Лим Х. Обзор технологий электролиза воды для производства экологически чистого водорода//Energy Reports.-2022.- № 8. - С. 13793-13813.

27. Hydrogen Production: Electrolysis [Электрон.ресурс]. – 2018. – URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis#:~:text=Electrolysis%20is%20a%20promising%20option,a%20unit%20called%20an%20electrolyzer> (дата обращения: 08.06.2021).

28. Hydrogen Delivery [Электрон.ресурс]. – 2018. – URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-delivery#:~:text=Today%2C%20hydrogen%20is%20transported%20from,to%20remain%20stable%20for%20decades.> (дата обращения:08.01.2023).

29. DOE Hydrogen & Fuel Cell Overview[Электрон.ресурс]. – 2018. – URL: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/h2_safety_fsheets.pdf (дата обращения: 02.06.2021).

30. Брюс С., Теммингхотт М., Хайвард Д., Шмидт Е., Муннингс К., Палфрейман Д. и Хартли П. // Национальная водородная дорожная карта Австралии – CSIRO.- 2018.- 97 с.
31. Као Ю., Янг Ё., Жао Ш. и Ли К Обзор мультиэнергетических систем сезонного хранения водорода на основе временных и пространственных характеристик // Журнал возобновляемых материалов, 2021.- № 9(11). -С.1823-1842.
32. Герберт Г. На развилке дорог: предлагают ли водородные автомобили лучшее будущее, чем электромобили[Электрон.ресурс]. – 2018. – URL: <https://www.euronews.com/next/2022/10/08/at-a-fork-in-the-road-do-hydrogen-cars-offer-a-better-future-than-electric> (дата обращения: 12.01.2019).
33. Президент поручил КазМунайГазу развивать водородную энергетику [Электрон.ресурс]. – 2018. – URL: <https://sknews.kz/news/view/prezident-opredelil-vodorodnuyu-energetiku-v-chisle-prioritetov> (дата обращения: 12.01.2019).
34. Жолдаякова С., Абуов Е., Жакупов Д., Сулейменова Б. и Ким А. На пути к водородной экономике в Казахстане // Институт Азиатского Банка Развития, Серия рабочих статей. -2022. -№ 1344. - С.232-247.
35. Президент поручил КазМунайГазу развивать водородную энергетику [Электрон.ресурс]. – 2018. – URL: <https://www.kmge.kz/в-кmg-инжиниринг-начал-функционировать/> (дата обращения: 12.03.2021).
36. [Электрон.ресурс]. – 2021. – URL: https://www.kmg.kz/upload/iblock/496/eh0hopsa0777d4uzle0ni80fxx9kb00/Отчет%20об%20устойчивом%20развитии_2021.pdf (дата обращения: 12.03.2021).
37. Серикпаев Д. Проект на \$50 миллиардов: как в Казахстане будут производить «зелёный» водород [Электрон.ресурс]. – 2021. – URL: https://forbes.kz/economy/energy-subsoil/kak_v_kazahstane_realizuyut_proekt_po_proizvodstvu_zelenogo_vodoroda_stoimostyu_50_mlrd (дата обращения: 12.04.2023).
38. «Водород газообразный. Заправочные станции» [Электрон.ресурс]-2020 URL: <https://ksm.kz/public-discussion/standards/discussion-of-draft-of-st-rk/102750/>
39. Национальный план стандартизации [Электрон.ресурс]. – 2020. – URL: <https://ksm.kz/activities/sp/plan/> (дата обращения: 12.04.2023).
40. EU Carbon Permits [Электрон.ресурс]. – 2020. – URL: <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon> (дата обращения: 12.04.2023).
41. Kazakhstan - Renewable Energy [Электрон.ресурс]. – 2020. – URL: <https://www.trade.gov/energy-resource-guide-kazakhstan-renewable-energy#:~:text=The%20potential%20of%20solar%20energy,range%20of%2015-25%25.> (дата обращения: 11.02.2021).
42. Kazakhstan - Oil & Gas [Электрон.ресурс]. – 2020. – URL: <https://www.trade.gov/energy-resource-guide-kazakhstan-renewable-energy>
43. <https://wernerantweiler.ca/blog.php?item=2020-09-28> (дата обращения: 12.05.2020).
44. Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector [Электрон.ресурс]. – 2020. – URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf (дата обращения: 02.01.2019).
45. Водные ресурсы [Электрон.ресурс]. – 2020. – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/qazalem/activities/27841?lang=ru> (дата обращения: 08.01.2020).
46. Каспийское море: гидрология и гидрохимия [Электрон.ресурс]. – 2020. – URL: <http://aquacultura.org/upload/files/pdf/library/sea/Каспийское%20море.pdf> (дата обращения: 08.02.2018).
47. Казахстане растёт дефицит пресной воды [Электрон.ресурс]. – 2020. – URL: <https://inbusiness.kz/ru/news/v-kazahstane-rastet-deficit-presnoj-vody> (дата обращения: 05.03.2019).
48. Водно-энергетическая программа для Центральной Азии [Электрон.ресурс]. – 2020. – URL: <https://www.vsemirnyjbank.org/ru/region/eca/brief/cawep> (дата обращения: 05.03.2019).
49. Министр экологии Казахстана предложил меры по недопущению дефицита воды в стране [Электрон.ресурс]. – 2020. – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/ecogeo/press/news/details/138615?lang=ru> (дата обращения: 05.03.2019).
50. The climate change impact on water resources in Kazakhstan [Электрон.ресурс]. – 2020. – URL: <https://www.undp.org/kazakhstan/stories/climate-change-impact-water-resources-kazakhstan> (дата обращения: 05.03.2019).
51. Шашкина А. Почему в Казахстане не хватает воды и что с этим делать [Электрон.ресурс]. – 2014. – URL: <https://ru.sputnik.kz/20210303/Pочему-v-Kazahstane-ne-khvataet-vody-i-chto-s-etim-delat-16442330.html> (дата обращения: 05.03.2019).

А.Е. Ибраева

Астана халықаралық университеті, Астана Қазақстан

Сутегі энергетикасы: тұрақты қоғамға көшу дәуіріндегі даму, артықшылықтар мен қиындықтар

Андатпа. Мақала Қазақстандағы сутегі энергетикасының даму әлеуетін талдайды. Халықаралық тәжірибені қарастыру және Қазақстанның сутегінің жаһандық нарығындағы ролін айқындау тәсілі таңдалды. Бұл ретте экологиялық саясат және экологиялық таза сутегіге сұраныстың болжамды өсуі сияқты дамудың негізгі әлемдік ынталандырулары ескеріледі. Химиялық кестенің ең кішкентай элементі бола отырып, сутегі бүгінгі күні Қазақстанда жеткіліксіз өндірісте, сақтауда, тасымалдауда және қолдануда ерекше техникалық және нормативтік базаны талап етеді. Екінші жағынан, қолда бар мұнай-газ инфрақұрылымы және елдегі жаңартылатын энергия көздерін дамытудың елеулі әлеуеті жұмысты бастау үшін елеулі артықшылық болып табылады. Жасыл сутегіге жаһандық сұраныстың артуы жағдайында Қазақстан экспорт үшін ауқымды өндіріс мүмкіндігіне ие болып қана қоймай, энергетика секторында және тар бағыттағы өнеркәсіпте көміртегі шығарындыларын азайту үшін экологиялық таза өнімге мұқтаж. Бұл ретте, су тапшылығы ықтималдығы жоғары және сутегімен жұмыс істеуде бірқатар елеулі техникалық шектеулер жағдайында экономиканың жаңа секторын дамыту кезең-кезеңмен стратегиялық тәсілді талап етеді.

Түйін сөздер: сутегі энергетикасы, баламалы энергия көздері, энергетика өнеркәсібі, тұрақты даму, экологиялық тепе-теңдік.

A.E. Ibrayeva

Astana International University, Astana Kazakhstan

Hydrogen energy: development, advantages, and challenges in the era of transition to a sustainable society

Abstract. The article analyzes the development potential of hydrogen energy in Kazakhstan. The approach of considering international experience and determining the role of Kazakhstan in the global hydrogen market is chosen. At the same time, the main global development incentives are considered, such as environmental policy and the projected growth in demand for environmentally friendly hydrogen. Being the smallest element of the chemical table, hydrogen requires a special technical and regulatory framework for production, storage, transportation and application, which are insufficient in Kazakhstan today. On the other hand, the existing oil and gas infrastructure and significant potential for the development of renewable energy sources in the country are a significant advantage for starting work. In the context of growing global demand for green hydrogen, Kazakhstan not only has the possibility of large-scale production for export, but also needs an environmentally friendly product to reduce carbon emissions in the energy sector and narrowly focused industry. At the same time, given the increased likelihood of water scarcity and a number of serious technical limitations in working with hydrogen, the development of a new sector of the economy will require a phased strategic approach.

Keywords: hydrogen energy, alternative energy sources, energy industry, sustainable development, ecological balance.

References

1. The Effects of Climate Change 2021. Available at: <https://climate.nasa.gov/effects/> [in Russian]. (accessed 18.05.2023).
2. Global energy-related CO2 emissions by sector Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-related-co2-emissions-by-sector> (accessed 22.07.2020).
3. Marchant N. Seryi, sinyii, zelenyii – pochemy sushestvuet tak mnogo cvetov 2021. Available at: <https://www.weforum.org/agenda/2021/07/clean-energy-green-hydrogen/> (accessed 19.06.2023).

4. The Future of Hydrogen Report prepared by the IEA for the G20, Japan Seizing today's opportunities Available at: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (accessed 15.03.2022).
5. Global Hydrogen Review Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5bd46d7b-906a-4429-abda-e9c507a62341/GlobalHydrogenReview2021.pdf> (accessed 07.04.2021).
6. State of Hydrogen Available at: <https://www.dceew.gov.au/energy/publications/australias-national-hydrogen-strategy> (accessed 18.01.2019).
7. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2020%3A301%3AFIN> (accessed 12.02.2023).
8. Carbon Border Adjustment Mechanism Available at: https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en (accessed 24.03.2023).
9. Sinkh R. Avstraliya peresmotrit I obnovit svou vodorodnuu strategiu na 2019 god: ministr – S&P Global, Available at: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/022423-australia-to-revise-renew-its-2019-hydrogen-strategy-minister#:~:text=The%20National%20Hydrogen%20Strategy%20says,chains%20for%20prospective%20hydrogen%20hubs.> (accessed 29.05.2023).
10. Basic Hydrogen Strategy Available at: https://cdn.climatepolicyradar.org/navigator/JPN/2017/basic-hydrogen-strategy-2017_c662e8efd1b8e5b70577b8a23cd97192.pdf (accessed 01.02.2017).
11. Tapping Hydrogen's Energy Potential Available at: https://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/global_warming/roadmap/innovation/thehp.html (accessed 17.07.2018).
12. Hydrogen RD&D Collaboration Opportunities: The Republic of Korea Available at: https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_551e67dca75340569e68e37eea18f28e.pdf (accessed 28.01.2022).
13. Outlook on Hydrogen Economy & Roadmap Available at: <https://icdk.dk/-/media/websites/icdk/locations-reports/seoul/outlook-on-korean-hydrogen-economy-and-roadmap.ashx> (accessed 28.01.2022).
14. O podderzhke ispolzovaniya vozobnovlyzemih istokhnikov energii Available at: https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z090000165_ (accessed 25.08.2020).
15. Available at: <https://www.rfc.kz/about> (accessed 20.09.2022).
16. O koncepcii po perehodu Respubliki Kazakhstan k zelenoi energetike Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U1300000577> (accessed 15.08.2022).
17. Kazakhstan Emissions Trading System. Available at: <https://icapcarbonaction.com/en/ets/kazakhstan-emissions-trading-system> (accessed 12.02.2021).
18. O podpisanii parizhskogo soglasheniya Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U1600000301> (accessed 12.02.2021).
19. Aukciyonnie torgy VIE 2023 Available at: <https://vie.korem.kz/> (accessed 28.05.2023).
20. Zhanartilgan energiya kozderin damitu Available at: <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo/activities/4910?lang=ru> (accessed 01.02.2023).
21. Available at: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=35734706 (accessed 01.02.2005).
22. Satubaldina A. Tokayev zavavlyayet o namerenii Kazakhstana dostich uglerodnoi neutralnost Available at: <https://ru.eureporter.co/frontpage/2020/12/16/tokayev-announces-kazakhstans-pledge-to-reach-carbon-neutrality-by-2060/> (accessed 02.01.2020).
23. Videnie Kazakhstana po doxtixheniy uglerodnoi neutralnosty predstavleno na vstreche visokogo urovnya Available at: <https://www.undp.org/ru/kazakhstan/news/видение-казахстана-по-достижению-углеродной-нейтральности-представлено-на-встрече-высокого-уровня-в-г-нур-султан> (accessed 13.10.2019).
24. Ob utverzhdenni Strategii dostizheniya uglerodnoi neutralnosty respubliki Kazakhstan do 2060 hanartilgan energiya kozderin damitu Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121> (accessed 19.10.2023).
25. Enegry transition. Available at: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen> (accessed 19.10.2023).
26. Hydrogen Production: Natural Gas Reforming. Available at: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming#:~:text=In%20steam-methane%20reforming%2C%20methane,for%20the%20reaction%20to%20proceed> (accessed 12.02.2021).
27. Kumar C.C. iLim H. Obzor tehnologii elektrolizs vody dlya proizvodstva ekologicheski chistogo vodoroda//Energy Reports. 2022. No.8. P. 13793-13813 .
28. Hydrogen Production: Electrolysis [Available at: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis#:~:text=Electrolysis%20is%20a%20promising%20option,a%20unit%20called%20an%20electrolyzer> (accessed 8.06.2021).

29. Hydrogen Delivery Available at: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-delivery#:~:text=Today%2C%20hydrogen%20is%20transported%20from,to%20remain%20stable%20for%20decades.> (accessed 08.01.2023).
30. DOE Hydrogen & Fuel Cell Overview Available at: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/h2_safety_fsheets.pdf (accessed 02.06.2021).
31. Brus S., Teminkhod M., Haivard D., Shmid E., Munnings K., Palfreiman D., hartli. CSIRO, 2018. 97 P.
32. Kao Uy., Yang E., Zhao Sh., Li K. Obzor multienergeticheskikh system sezonnogo hraneniya vodoroda na osnove vremennih i prostranstvennih harakteristi. Zhurnal vozobnovlyaemih materialov. 2021. No. 9(11). P.1823-1842.
33. Gerbert G. Na razvilke dorog: predlagaut li vodorodnie avtomobili luchshee budushee, chem electromobili? Available at: <https://www.euronews.com/next/2022/10/08/at-a-fork-in-the-road-do-hydrogen-cars-offer-a-better-future-than-electric> (accessed 12.01.2019).
34. President poruchil Kaz Munai gaz razvivat vodorodnyuy energetiky Available at: URL: <https://sknews.kz/news/view/prezident-opredelil-vodorodnyuy-energetiku-v-chisle-prioritetov> (accessed 12.01.2019).
35. Zholdayakova S., Abuov S., Zhakupov D., Suleimenova B., Kim A/Na puti k vodorodnoi ekonomike d Kazakhstane//Institut Aziatskogo banka Razvitiya. 2022. No. 1344. P.232-247
36. Prezident poruchil KazMunajGazu razvivat' vodorodnuju jenergetiku. Available at: <https://www.kmge.kz/в-кмг-инжиниринг-начал-функционировать/> (accessed 12.03.2021).
37. Available at: https://www.kmge.kz/upload/iblock/496/eh0hopsa0777d4uzlee0ni80fxx9kb00/Отчет%20об%20устойчивом%20развитии_2021.pdf (accessed 12.03.2021).
38. Serikpayev D. Proect na \$50 milliardov :kak v Kazakhstane budut proizvodit zelenyi vodorod Available at: https://forbes.kz/economy/energy-subsoil/kak_v_kazahstane_realizuyut_proekt_po_proizvodstvu_zelenogo_vodoroda_stoimostyu_50_mlrd (accessed 12.04.2023).
39. «Vodorod gazoobraznyj. Zapravochnye stancii». Available at: <https://ksm.kz/public-discussion/standards/discussion-of-draft-of-st-rk/102750/> (accessed 05.02.2014).
40. Nacional'nyj plan standartizacii. Available at: <https://ksm.kz/activities/sp/plan/> (accessed 12.04.2023).
41. EU Carbon Permits. Available at: <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon> (accessed 12.04.2023).
42. Kazakhstan - Renewable Energy. Available at: <https://www.trade.gov/energy-resource-guide-kazakhstan-renewable-energy#:~:text=The%20potential%20of%20solar%20energy,range%20of%2015-25%25.> (accessed 11.02.2021).
43. Kazakhstan - Oil & Gas. Available at: <https://www.trade.gov/energy-resource-guide-kazakhstan-renewable-energy> (accessed 12.05.2020).
44. <https://wernerantweiler.ca/blog.php?item=2020-09-28> (accessed 12.05.2020).
45. Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector. Available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf (accessed 02.01.2019).
46. Vodnye resursy. Available at: <https://www.gov.kz/memleket/entities/qazalem/activities/27841?lang=ru> (accessed 08.01.2020).
47. Kaspijskoe more: gidrologija i gidrohimija. Available at: <http://aquacultura.org/upload/files/pdf/library/sea/Каспийское%20море.pdf> (accessed 8.02.2018)
48. Kazahstane rastet deficit presnoj vody. Available at: <https://inbusiness.kz/ru/news/v-kazahstane-rastet-deficit-presnoj-vody> (accessed 5.03.2019)
49. Vodno-jenergeticheskaja programma dlja Central'noj Azii. Available at: <https://www.vsemirnyjbank.org/ru/region/eca/brief/cawep> (accessed 5.03.2019).
50. Ministr jekologii Kazahstana predlozhl mery po nedopushheniju deficita vody v strane. Available at: <https://www.gov.kz/memleket/entities/ecogeo/press/news/details/138615?lang=ru> (accessed 05.03.2019).
51. The climate change impact on water resources in Kazakhstan Available at: <https://www.undp.org/kazakhstan/stories/climate-change-impact-water-resources-kazakhstan> (accessed 05.03.2019).
52. Shashkina A. Pochemy v Kazakhstane ne hvataet vody I chto s nim delat Available at: <https://ru.sputnik.kz/20210303/Pochemu-v-Kazahstane-ne-khvataet-vody-i-chto-s-etim-delat-16442330.html> (accessed 5.03.2019).

Сведения об авторе:

Ибраева Айгерим Ергалиевна – Ph.D., постдокторант по проекту «Жас ғалым» Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, Международный Университет «Астана», Астана, Казахстан.

Ibraeva Aigerim Yergalievna – Ph.D., postdoctoral fellow on the project «Zhas galym» of the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, International University «Astana», Astana, Kazakhstan.