



Energy Dialogue
Germany – Central Asia

Водообеспечение для производства зеленого водорода в Казахстане

*Часть I: Устойчивое управление водными ресурсами для
производства зеленого водорода в Казахстане*



Правовая информация

Издатель:

Немецкое энергетическое агентство (dena)
Chausseestrasse 128 a
10115 Berlin, Germany
Тел: +49 30 66 777-0
Факс: +49 30 66 777-699
Эл. почта: info@dena.de
Веб-сайт: www.dena.de

Авторы:

Вайз, Фабио (dena)
Франк, Даниэль, д-р (Общество химической техники и биотехнологии e.V. DECHEMA)
Хина, Адиль Рана (dena)
Штюве, Роберт, д-р (dena)

Благодарность: Мы благодарим Максимилиана Хирхаммера, Мелину Ломанн, Еву Шмид и Лауру Дросте за их вклад в разработку и написание этой работы.

Последнее обновление:

Декабрь 2023 года

Все права защищены. Любое использование данной публикации возможно только с согласия Немецкого энергетического агентства (dena).

При цитировании данной публикации просим делать следующую ссылку:

Немецкое энергетическое агентство (издатель) (dena / 2023 год) "Водообеспечение для устойчивого производства водорода в Казахстане. Часть I: Устойчивое управление водными ресурсами для производства зеленого водорода в Казахстане".



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action



DECHEMA

Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.

dena
German Energy Agency

Данная публикация была издана в рамках Энергетического Диалога между Казахстаном и Германией по поручению Федерального министерства экономики и защиты климата Германии (BMWK) Немецким энергетическим агенством (dena) в сотрудничестве с Обществом химической техники и биотехнологии e.V. (DECHEMA).

Содержание

Список рисунков	4
Основные выводы	5
Резюме для руководства	6
1 Введение	7
2 Техническая оценка использования воды для производства зеленого водорода	8
2.1 Потребность в воде и управление водными ресурсами при производстве водорода	8
2.2 Потребность в воде для различных типов электролизеров	9
2.3 Требования к подготовке воды для производства водорода	10
2.4 Методы опреснения воды для получения водорода.....	11
2.5 Очистка охлаждающей воды и стоков	12
3 Стандарты устойчивого развития для производства водорода из местных водных ресурсов	14
3.1 Критерии устойчивого водопользования при сертификации водорода.....	14
3.2 Механизмы производства водорода и правила устойчивого водопользования	15
4 Водный комплекс Казахстана	17
4.1 Состояние водных объектов Казахстана.....	17
4.2 Управление и обращение с водными ресурсами в Казахстане	18
4.3 Сложности управления водными ресурсами в Казахстане.....	19
5 Как производство водорода повлияет на водные ресурсы Казахстана	20
5.1 Сценарии производства зеленого водорода	20
5.2 Объемы воды, необходимые для производства водорода.....	21
5.3 Дискуссии вокруг последствий производства водорода	22
6 Заключение	24
Источники	25

Список рисунков

- Рисунок 1: Для получения 1 кг водорода методом электролиза требуется от 12 до 30 кг воды, в зависимости от её источника 8
- Рисунок 2: Средняя интенсивность водозабора при ПМ и щелочном электролизе составляет около 25,7 л H₂O/кг H₂ и 32,2 л H₂O/кг H₂, соответственно 10
- Рисунок 3: Водно-хозяйственные бассейны Казахстана с имеющимися водными ресурсами, более 50% которых формируется за счет трансграничного притока воды. 17
- Рисунок 4: Согласно углеродной нейтральности, в 2040 году объем производства водорода в Казахстане может составить около 1,8 млн тонн 21
- Рисунок 5: По сравнению с другими водопользователями (представлены в логарифмическом масштабе), воздействие этих пользователей на водные ресурсы относительно невелико, но его необходимо оценивать в каждом конкретном случае, поскольку водные ресурсы сильно зависят от доступности на местах 22
- Рисунок 6: Важнейшим фактором при оценке производства водорода в Казахстане является распределение воды на местном уровне. Производство зеленого водорода невозможно без достаточных водных ресурсов. 22

Основные выводы

Устойчивое использование воды играет важную роль в производстве водорода. Для производства 1 кг водорода требуется от 15 до 30 кг воды, в зависимости от источника воды и применяемой технологии электролиза. Для получения по-настоящему устойчивого зеленого водорода при сертификации продукции по параметру «использование воды» потребуются указать источник, использование, объемы, способы восстановления пригодных источников воды, поверхностная вода или подземные воды, или, в случае морской воды, сообщить о применении опреснительных установок.

К главным проблемам водного комплекса Казахстана относятся потери воды при транспортировке из-за износа инфраструктуры, неэффективное использование воды (например, в сельскохозяйственной отрасли для целей ирригации), и вызванное изменением климата повышение колебаний температуры и осадков.

Крайне необходимо проделать оценку того воздействия на окружающую среду, которое окажет производство зеленого водорода в Казахстане. В рамках такой комплексной оценки следует указать, как используется вода на каждом из этапов цепочки создания стоимости в производстве водорода, и дать количественное определение водного баланса на уровне водных бассейнов и водных объектов, включая озера и реки.

Переход на водородную экономику открывает новые возможности, но при этом требует эффективной политики в отношении водных ресурсов. Для обеспечения ответственного и устойчивого использования существующих водных ресурсов жизненно важно наладить сотрудничество между государственными органами. В рамках этого сотрудничества необходимо, среди прочего, оптимизировать политику, направленную на решение потенциальных конфликтов по поводу водопользования, особенно в тех отраслях, где применяются водоемкие процессы.

Для преодоления угрозы нехватки воды в Казахстане нужна комплексная модель рационального использования водных ресурсов для всего Центрально-Азиатского региона. Признавая, что в будущем поставок воды из соседних стран может оказаться недостаточно, необходимо разработать комплексный и согласованный подход со стороны всего Центрально-Азиатского региона. Сотрудничество между странами Центральной Азии имеет большое значение для решения проблем с нехваткой воды. Это сотрудничество должно быть направлено на повышение эффективности использования воды, модернизацию систем ирригации и внедрение передовых технологий в рамках инициативы по управлению водными ресурсами.

Глобальная природа нехватки воды требует международного внимания и согласованных усилий. Помимо признания серьезности самой проблемы, первостепенное значение имеет твердая решимость наращивать потенциал и оптимальная организация глобальных инициатив.

Резюме для руководства

Не только для производства возобновляемой электроэнергии, но и для производства зеленого водорода в качестве исходного продукта необходима вода. В настоящем исследовании рассматриваются те задачи, которые необходимо решить для организации устойчивого производства зеленого водорода в таких засушливых регионах, как Казахстан. Представлены технические спецификации и информация о потребности в воде для производства водорода по щелочной технологии, при помощи протонообменных мембран и высокотемпературного электролиза. Кроме того, дано описание технологии производства сверхчистой воды, то есть получаемой с помощью водоподготовки воды очень высокого качества, и рассматривается опреснение как альтернатива использованию пресноводных ресурсов. Далее, в анализе рассматриваются существующие нормативные акты и критерии сертификации водорода, связанные с устойчивым водопользованием. Наряду с этим, в исследовании предлагается анализ водного комплекса страны, дается описание существующих механизмов государственного регулирования и управления, и перечисляются задачи в сфере водопользования Казахстана. Также, в данной работе анализируется воздействие производства зеленого водорода на природу Казахстана и дается количественная оценка объемов воды, нужных для этого производства.

1 Введение

Казахстан расположен в Центральной Азии и является девятой по величине страной в мире. Казахстан богат различными полезными ископаемыми, в том числе такими ископаемыми видами топлива как нефть, природный газ и уголь. Экономика страны в значительной степени базируется на экспорте сырой нефти и поэтому зависит от колебаний цены на нефть. В последние годы своего правления предыдущий президент Нурсултан Назарбаев стремился модернизировать экономику и вывести всю страну на путь «зеленого» развития. В феврале 2023 года нынешний президент Казахстана Касым-Жомарт Токаев утвердил Стратегию достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года, которая ставит амбициозные цели по декарбонизации страны с нулевыми выбросами углерода. Для достижения этих целей Казахстан должен трансформировать свою энергоемкую промышленность, отказываясь от ископаемого топлива, поощряя развитие возобновляемых источников энергии и внедряя меры по повышению энергоэффективности в промышленности и местных органах власти.

Условия в Казахстане благоприятствуют производству электричества из возобновляемых источников, включая солнечную и ветровую энергию. Теоретический потенциал производства составляет 2,5 тераватт-часа (ТВтч) для солнечной энергии и 920 ТВтч для ветровой энергии, что примерно в 9 раз больше общего объема выработки электроэнергии в 2020 году (IEA, 2022). Руководство Казахстана рассматривает применение зеленого водорода и его производных. В последние годы предпринимаются усилия по созданию основ для производства, транспортировки и потребления зеленого водорода в Казахстане. Ожидается, что низкоуглеродный водород будет использоваться в основном в таких промышленных отраслях, как сталелитейная и химическая промышленность, где невозможна прямая электрификация, а также в транспортной отрасли.

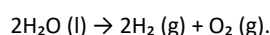
Помимо возобновляемой электроэнергии, другим важным компонентом, необходимым для производства зеленого водорода, является вода. В целом, потребность в воде можно покрывать из всех доступных водных источников, включая подземные и поверхностные воды, морскую воду и водопроводную воду из существующей сети. Порождённый производством водорода дополнительный спрос может привести к конкуренции за воду на местном или даже региональном уровне (Heinemann and Mendelevitch, 2021). Казахстан – очень засушливая страна со скудными водными ресурсами. Водные ресурсы, в основном поверхностные воды, очень неравномерно распределены по территории страны и подвержены сезонным колебаниям. Кроме того, водные ресурсы Казахстана также сильно зависят от притока воды из соседних стран, который составляет около 44% всех поверхностных вод (Министерство экологии и природных ресурсов РК, 2023а). Ожидается, что в ближайшие годы последствия изменения климата ухудшат ситуацию с водными ресурсами в Казахстане. Уже наблюдались температурные сдвиги и сдвиги в объеме осадков, приведшие к опустыниванию и деградации пахотных земель и пастбищ. Согласно оценкам, в той или иной степени деградации уже подвержено 66% орошаемых земель (World Bank, 2022). Принимая во внимание все эти факторы, важно оценить перспективность производства «зеленого» водорода в Казахстане. Возникает следующий вопрос: *какие существуют проблемы для производства зеленого водорода в засушливом регионе и как можно добиться устойчивого производства зеленого водорода в Казахстане?*

2 Техническая оценка использования воды для производства зеленого водорода

Многообещающей альтернативой на пути к более чистой и устойчивой энергетике будущего стал экологически чистый, или «зеленый» водород. Зеленый водород производится методом электролиза — процесса, в ходе которого при помощи возобновляемой электроэнергии вода расщепляется на водород и кислород. Потенциал зеленого водорода для декарбонизации различных отраслей неоспорим, однако в процессе его производства требуется значительное количество воды.

2.1 Потребность в воде и управление водными ресурсами при производстве водорода

В производстве экологически чистого водорода используется технология электролиза, для которого в качестве исходного сырья требуется сверхчистая вода. Сверхчистая вода (СЧВ) — это термин, обозначающий воду высокого качества, в которой отсутствуют такие загрязняющие вещества, как микробы, минеральные соли и растворенные газы (Onissiphorou, 2022). Она состоит исключительно из молекул H_2O . Уровень её очистки равен или почти равен 100%. Данный процесс происходит в электролизёре, в котором электрический ток пропускается через воду и разделяет молекулу воды на водород и кислород. Основная реакция протекает следующим образом:



В процессе электролиза используется вода. Объем необходимой воды зависит от нескольких факторов, включая тип электролизёра, эффективность и масштаб производства. По текущим оценкам, для производства одного килограмма водорода требуется от 9 до 15 литров СЧВ, в зависимости от качества исходной воды и производительности очистного оборудования (см. рис. 1).



Рисунок 1: Для получения 1 кг водорода методом электролиза требуется от 12 до 30 кг воды, в зависимости от её источника.

Источник: Schmidt and Frank (2023)

Притом что зеленый водород обладает значительным потенциалом, потребность в воде для его производства создает определенные трудности, такие как нехватка воды, воздействие на окружающую среду, конкурирующие потребности. В регионах, уже столкнувшихся с нехваткой или дефицитом воды, увеличение спроса на воду для производства водорода может обострить существующие проблемы. Решающую роль начинает играть нахождение баланса между использованием воды на производство водорода и на другие жизненно важные нужды. Это подчеркивает важность эффективного управления водой и рационального водопользования. При этом, нерациональное использование водных ресурсов или забор чрезмерных объемов воды может нанести вред водным экосистемам и нарушить биоразнообразие. Более того, в некоторых процессах Power-to-X производится

отработанная вода, которую нужно подвергать дополнительной очистке. Также, развитие водородной отрасли может усилить конкуренцию за воду между сельским хозяйством, местными органами власти и промышленностью. Это может даже привести к конфликтам из-за водных ресурсов. Чтобы избежать такого развития события, необходимы тщательный мониторинг, управление и регулирование.

Удовлетворение потребности в воде для производства зеленого водорода требует многостороннего подхода. Во-первых, развитие технологии электролиза может привести к повышению эффективности и уменьшению потребления воды. Ведутся научно-исследовательские и конструкторские работы, направленные на повышение эффективности протонообменной мембраны и щелочных электролизеров. Например, разрабатывается высокотемпературный электролиз для первых крупномасштабных проектов в ближайшем будущем. Во-вторых, выбор производственных площадок в регионах с обильными водными ресурсами поможет снизить нагрузку на районы, испытывающие дефицит воды. Однако такой подход должен быть сбалансирован с другими соображениями экологии. В-третьих, устойчивым источником воды для производства водорода в прибрежных районах может стать опреснение морской воды, хотя и с учетом своих энергетических и экологических соображений. Кроме того, важную роль в стимулировании водосберегающих технологий и поощрении ответственного подхода к управлению водными ресурсами в водородной отрасли могут сыграть органы власти и регулирующие органы.

2.2 Потребность в воде для различных типов электролизеров

Основными компонентами производства водорода путем электролиза воды являются электролизеры. За прошедшие годы появились различные типы электролизеров, каждый из которых имеет свои характеристики, преимущества и специфические требования. Среди этих требований важнейшую роль в обеспечении эффективности и долговечности процесса электролиза играет электропроводность воды. В данном разделе мы рассматриваем различные типы электролизеров и их потребление воды.

Щелочные электролизеры

Щелочные электролизеры используются уже много десятилетий. Это одна из самых первых технологий. Они работают в растворе щелочного электролита (как правило, гидроксид калия) и требуют относительно высокой проводимости воды. Для обеспечения эффективного переноса ионов и предотвращения потерь энергии необходимо поддерживать электропроводность электролита. К щелочным электролизерам часто предъявляются строгие требования по чистоте, так как даже небольшое содержание примесей может нарушить электропроводность электролита. Как показано на Рис. 2, интенсивность забора воды составляет около 32,2 л H₂O/кг H₂, а интенсивность потребления воды составляет около 22,3 л H₂O/кг H₂. Значения интенсивности забора и потребления воды относятся к объемам воды, забираемой или потребляемой при производстве 1 кг водорода. (IRENA and Bluerisk, 2023).

Электролизёры с применением протонообменной мембраны (ПМ)

ПМ-электролизеры работают при более низких температурах и благодаря своим компактным размерам подходят для производства водорода на месте. В этих электролизерах в качестве электролита используется полимерная мембрана, проводящая протоны. Вода, подаваемая в ПМ-электролизер, должна обладать определенным уровнем проводимости, чтобы облегчить перенос протонов через мембрану. При этом чрезмерное количество примесей или высокая концентрация ионов могут привести к ухудшению состояния мембраны, снижению ее производительности и сокращению срока службы. Как показано на рис. 2, интенсивность забора воды составляет около 25,7 л H₂O/кг H₂, а интенсивность потребления воды составляет около 17,5 литров H₂O/кг H₂. Значения интенсивности забора и потребления воды относятся к объемам воды, забираемой или потребляемой при производстве 1 кг водорода. (IRENA and Bluerisk, 2023).

Твердооксидные электролизные элементы (ТОЭЭ)

ТОЭЭ — это высокотемпературные электролизеры, работающие при температурах свыше 700 °С. В качестве электролита они используют твердооксидный керамический материал, который проводит ионы кислорода. Хотя в ТОЭЭ-электролизерах проводимость воды играет не такую важную роль, как в щелочных или ПМ-электролизерах, поддержание надлежащего содержания водяного пара и предотвращение избытка углекислого газа в исходных газах имеют решающее значение для недопущения образования карбонатов на поверхности электролита.

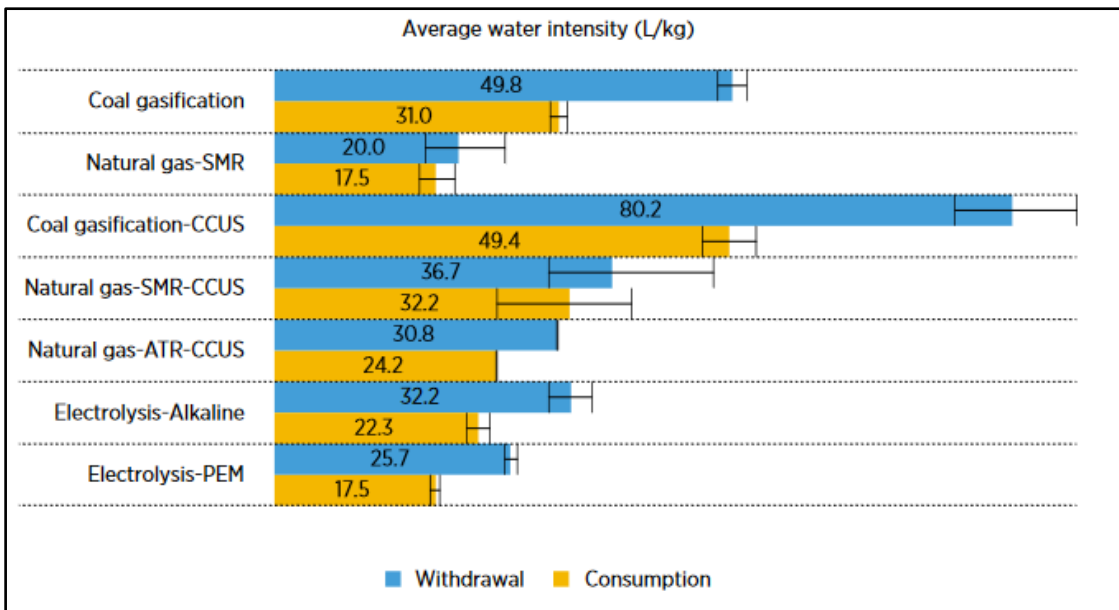


Рисунок 2: Средняя интенсивность водозабора при ПМ и щелочном электролизе составляет около 25,7 л H₂O/кг H₂ и 32,2 л H₂O/кг H₂, соответственно.

Источник: IRENA and Bluerisk (2023)

Average water intensity	Средняя потребность в воде
Coal gasification	Газификация каменного угля
Natural gas – SMR	Природный газ – паровой риформинг метана (ПРМ)
Coal gasification – CCUS	Газификация каменного угля – технологии улавливания, использования и хранения углерода (УИХУ)
Natural gas – SMR – CCUS	Природный газ – ПРМ – УИХУ
Natural gas – ATR – CCUS	Природный газ – Автотермический риформинг – УИХУ
Electrolysis Alkaline	Щелочной электролиз
Electrolysis PEM	ПМ-электролиз
Withdrawal	Водозабор
Consumption	Водопотребление

2.3 Требования к подготовке воды для производства водорода

Качество воды, используемой в процессе электролиза, играет решающую роль в обеспечении эффективности, долговечности и экологичности электролизеров. Для достижения требуемой чистоты следует соответствующим образом подготовить исходную воду, даже если используется подземная или питьевая вода. Требуемые усилия зависят от типа используемой сырой воды. Если используется морская вода, то выход составляет 40-50% (в случае обратного осмоса, при термическом подходе это значение выше), а для других источников сырой воды, например, подземных вод, 75-80 %. (Saravia et al., 2023). Разницу между 100% исходного сырья и процентом выхода составляет остаток — рассол, представляющий собой отходы, или концентрат, которые можно переработать или утилизировать.

Ключевым параметром для электролиза воды является ее электропроводность, измеряемая в микросименсах на сантиметр ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Соответствующий уровень электропроводности зависит от типа электролизера:

- **Щелочные электролизеры.** Для них обычно требуется электропроводность воды в диапазоне от 1000 до 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, которая достигается добавлением щелочных агентов в сверхчистую воду. Для эффективной ионной проводимости необходимо обеспечить надлежащую концентрацию раствора щелочного электролита.
- **ПМ-электролизеры.** Рекомендуемая электропроводность воды для ПМ-электролизеров находится в диапазоне 1-10 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Этот диапазон позволяет соблюсти баланс между потребностью в эффективном

переносе ионов и предотвращением накопления чрезмерного количества примесей, которые могут повредить полимерную мембрану.

- **ТОЭЭ.** Эти электролизеры работают при высоких температурах: водяной пар часто подается в систему в виде пара, нагретого до высоких значений. При этом что проводимость здесь играет не такую важную роль, для сохранения стабильности электролита необходимо поддержание заданного уровня водяного пара.

Поддержание надлежащей проводимости обеспечивает эффективный перенос ионов и сводит к минимуму потери энергии. И хотя каждый тип электролизера предъявляет к проводимости свои требования, общая цель состоит в том, чтобы найти баланс между созданием среды, благоприятной для ионной проводимости, и минимизацией примесей, которые могут повредить процессу электролиза. Общую оценку возможных примесей см. у Becker et al. (2023 г.).

Оборудование для водоподготовки

Как правило, очистка воды осуществляется с помощью обратного осмоса (ОО). Этот процесс широко используется для удаления солевых отложений. В этой методике для удаления из воды растворенных солей, минералов и примесей используется полупроницаемая мембрана. Системы ОО обеспечивают высокий уровень чистоты и снижают риск образования накипи, коррозии и загрязняющих отложений в электролизере. Система обратного осмоса производит «деионизированную» воду и таким образом повышает эффективность и долговечность процесса электролиза.

Чем выше давление на мембрану, тем сильнее пропорционально увеличивается скорость потока фильтрата. Целью этой стадии очистки является получение фильтрата с проводимостью 5-10 $\mu\text{S}/\text{см}$, который подходит для процесса электродеионизации. В фильтрате, полученном в результате обратного осмоса, солевая нагрузка должна быть снижена на 99%. Это означает, что может потребоваться второй этап обратного осмоса в зависимости от проводимости исходной воды.

Однако следует помнить, что для получения сверхчистой воды обратного осмоса недостаточно, и в зависимости от исходной среды необходимо проводить предварительную очистку. Существует целый ряд возможных технологий предварительной очистки, которые также можно сочетать различными способами:

- *Фильтрация частиц.* Для удаления из воды твердых частиц и взвесей используются фильтрующие устройства, в т.ч. фильтры с активированным углем. Эти фильтры предотвращают засорение деталей электролизера и защищают материалы электродов от негативного воздействия хлора.
- *Обеззараживание с помощью ультрафиолетового излучения для удаления патогенов:* Для уничтожения микроорганизмов и бактерий в воде используются системы УФ- или озонового обеззараживания. Хотя производство водорода обычно происходит при повышенных температурах, эти методы дезинфекции обеспечивают дополнительный уровень защиты от потенциального образования биопленок и микробного заражения.
- *Фильтры с гранулированным активированным углем (ГАУ)*
- *Дозированное добавление антинакипина* с целью предотвращения осаждения солей на мембране обратного осмоса или система декальцинации для снижения жесткости воды (удаления солей кальция и магния)
- *Системы дегазации* (особенно актуально, если установлена система электродеионизации).

Объем необходимых процессов предварительной обработки определяется степенью минерализации воды (СМВ), содержанием органических веществ (СОВ), и содержанием хлора и углерода. После ОО дальнейшую очистку можно проводить с помощью ионообменников со смешанным слоем или электродеионизации (ЭДИ) (так называемая стадия «полировки»). Системы умягчения воды используют ионообменную смолу для удаления ионов кальция и магния, делающих воду жесткой. Водоумягчители способствуют бесперебойной работе электролизеров, тем самым предотвращая образование накипи и снижая вероятность возникновения проблем, связанных с накипью. В качестве альтернативы обратному осмосу можно также использовать термические процессы, такие как вакуумное выпаривание, особенно если можно использовать отходящее тепло электролизера.

2.4 Методы опреснения воды для получения водорода

Опреснение — это процесс удаления соли и других примесей из морской воды или солоноватой воды, благодаря чему она делается пригодной для различных нужд. В случае производства водорода, опреснение воды дает альтернативный источник воды, который является обильным, но требующий больших затрат энергии.

Рассматриваются два основных метода опреснения воды:

- **Обратный осмос (ОО).** Обратный осмос предполагает пропускание воды через полупроницаемую мембрану для удаления солей, минералов и примесей. Очищенная вода, выходящая с другой стороны мембраны, может быть использована для производства водорода. Несмотря на то, что обратный осмос является более энергоэффективным, чем другие методы опреснения, он все равно требует значительных затрат энергии.
- **Многостадийная флеш-дистилляция (МФД).** МФД-дистилляция — это более энергоемкий процесс, при котором морская вода в несколько этапов нагревается и выпаривается, оставляя отходы после в виде соли и примесей. Затем пар конденсируется для получения пресной воды. Этот метод часто используется в крупных опреснительных установках.

С одной стороны, у опреснения воды для производства водорода есть ряд преимуществ. Например, опреснение обеспечивает надежный источник воды в районах, где пресноводные ресурсы скудны или ненадежны. Это обеспечивает постоянный доступ к воде для производства зеленого водорода. Кроме того, использование опресненной воды для производства водорода может снизить конкуренцию с другими водоемкими отраслями, такими как сельское хозяйство и коммунальное хозяйство. И, наконец, в прибрежных районах опреснение морской воды снижает негативное воздействие на окружающую среду из-за добычи пресной воды и сохраняет местные экосистемы.

С другой стороны, при опреснении воды возникает ряд трудностей. Во-первых, опреснение — это энергоемкий процесс, что может вызвать опасения по поводу углеродного следа и экономической эффективности производства водорода. Смягчить эту проблему может помочь использование возобновляемых источников энергии для опреснения. Во-вторых, при опреснении в качестве побочного продукта образуется рассол. Его необходимо надлежащим образом утилизировать, чтобы не нанести ущерба морской среде или, в случае стран, не имеющих выхода к морю, внутренним экосистемам. В настоящее время изучаются новейшие решения по обращению с рассолом. В-третьих, из-за высокого содержания минералов в морской воде в оборудовании для опреснения может образоваться накипь. Для предотвращения потери эффективности необходимы эффективные стратегии технического обслуживания и очистки.

Опреснение воды для производства водорода — перспективная технология, особенно в тех регионах, где ресурсы пресной воды ограничены. Чтобы сделать этот подход более экологичным, ведутся исследования по разработке энергоэффективных технологий опреснения, интеграции возобновляемых источников энергии и оптимизации всего процесса. По мере развития водородной отрасли большую роль в обеспечении ответственного водопользования и минимизации воздействия на окружающую среду будут играть стратегическое планирование и сотрудничество между производителями водорода и специалистами по опреснению воды.

Перспективы: электролиз морской воды

В этой технологии морская вода напрямую используется в качестве сырья для электролиза. Уровень готовности технологии: УГТ 3-4. Считается, что для принятия инвестиционного решения в ближайшие годы эта технология еще на рынке не доступна. В число актуальных тем текущих исследований входят:

1. **Коррозия и загрязняющие отложения.** Коррозионная природа морской воды и присутствие морских организмов могут создавать проблемы для материалов и производительности электролизеров. Для обеспечения долговечности конструкции электролизеров эти факторы необходимо учитывать.
2. **Содержание минеральных солей.** Концентрация минеральных солей в морской воде выше, чем в пресной. Для предотвращения образования накипи и отложений на электродах и других деталях необходимо обеспечить правильное управление.
3. **Энергопотребление.** Электролиз морской воды, как правило, требует более значительных затрат электроэнергии из-за более высокого содержания ионов по сравнению с пресной водой. Смягчить эту проблему может помочь правильное проектирование системы электролизера и использование возобновляемых источников энергии для опреснения.
4. **Утилизация рассола.** При электролизе морской воды образуется концентрированный побочный продукт — рассол, который требует ответственной утилизации во избежание нанесения вреда окружающей среде.

2.5 Очистка охлаждающей воды и стоков

При рассмотрении общего количества связанных с водой технологических потоков в установке по производству водорода необходимо учитывать потоки охлаждающей воды и потенциально образующиеся сточные воды в результате так называемых процессов «Энергия-в-Х» / Power-to-X (PtX).

Чтобы свести к минимуму образование накипи и биообрастаний в контуре охлаждающей воды, рекомендуется использовать воду того же качества, что и для процесса электролиза. Поэтому можно использовать те же процессы очистки, которые применялись для получения сверхчистой воды. Хотя охлаждающую воду необходимо время от времени заменять, ее общее количество незначительно по сравнению с количеством воды, используемой для электролиза, при условии наличия замкнутого контура охлаждающей воды.

Очистка сточных вод для процессов PtX включает в себя различные технологии удаления примесей и загрязняющих веществ из сточных вод, образующихся в ходе этих процессов. PtX относится к технологиям, которые преобразуют энергию, обычно из возобновляемых источников, в другие формы энергии или продукты, такие как производство метанола или экологически чистого авиационного топлива с помощью реакторов Фишера-Тропша. При очистке сточных вод для PtX-процессов выбор технологии зависит от таких факторов, как тип и концентрация загрязнений, масштаб производства и требуемые стандарты качества воды. В целом, технологии, используемые для очистки сточных вод в процессах PtX, не отличаются от технологий очистки промышленных / коммунальных сточных вод. Кроме того, решающую роль в выборе подходящих технологий играют нормативные требования и вопросы экологии.

3 Стандарты устойчивого развития для производства водорода из местных водных ресурсов

Во многих регионах мира вода становится все более дефицитным ресурсом. Одна из целей устойчивого развития – добиться, чтобы температура во всем мире выросла существенно меньше 2 °C от уровня доиндустриальной эпохи. Для достижения этой цели недостаточно просто снижать выбросы парниковых газов. Также, для обеспечения устойчивого энергоперехода важно на глобальном и местном уровнях понимать и регулировать интенсивность использования воды при производстве электроэнергии, а также энергоносителей, таких как водород (Terrapon-Pfaff et al., 2020).

Для разработки значимых оценок экологичности используемых процессов необходимо изучить всю цепочку создания стоимости, как на этапе выработки (up-stream), так и на этапе потребления (down-stream) (PtX-Hub, 2022). Для того чтобы производство зеленого водорода соответствовало установленным Целям устойчивого развития, жизненно важно разработать стандарты и схемы сертификации. Это обеспечит ясность для инвесторов, руководителей предприятий и клиентов. Критерии устойчивого развития могут быть включены разными способами. Хайнеманн и Менделевич (Heinemann and Mendelevitch (2021) предлагают различные варианты включения критериев для проектов по производству водорода, например, в руководства по финансированию, в добровольные схемы, в инициативы по закупкам водорода, правила торговли, а также в правила технологической поддержки и стандарты.

3.1 Критерии устойчивого водопользования при сертификации водорода

Системы сертификации играют решающую роль в проверке конкретных стандартов, связанных с продуктами или услугами. Обычно, системы сертификации включают два основных элемента: критерии, описывающие конкретные требования, и систему, обеспечивающую соответствие установленным критериям. (GIZ, 2021). Эти системы служат доказательством соблюдения установленных стандартов и конкретных требований, обеспечивая доверие и прозрачность для потребителей. Сертификация может быть обязательной или добровольной. Ее проводят независимые органы, которые проверяют соблюдение участниками рынка критериев, изложенных, например, в регулятивных документах, правилах или договорных обязательствах. К важнейшим элементам успешной системы сертификации относятся управление при определении ролей и обязанностей, применение стандартов, оценка соответствия, а также проверка соблюдения требований и принуждение к такому соблюдению (IEA, 2023).

В настоящее время сертификация водорода ещё находится на ранней стадии во всем мире, и разрабатывается множество стандартов. Согласно GIZ (2021), важно отметить, что в настоящее время в схемы сертификации водорода не входят основные критерии устойчивого развития, в т.ч. такие аспекты, как водоснабжение и водопользование, социальное воздействие и развитие местных сообществ. В целом ряде публикаций (например, Heinemann and Mendelevitch (2021), GIZ (2021), Bracker (2017), TÜV Nord (2023), NWR (2021) рассматриваются критерии использования воды как ресурса и отдельные аспекты устойчивого производства водорода.

Во-первых, очень важно, чтобы производство водорода не создавало дополнительной нагрузки на местные водные ресурсы в краткосрочной, сезонной или долгосрочной перспективе. Для этого производство водорода должно соответствовать существующим правам на воду и планам управления водными ресурсами, с тем чтобы свести к минимуму конфликты с другими водопользователями, например, с ирригацией. Кроме того, идеальный сценарий предполагает, что в результате реализации водородного проекта местное население выиграет от расширения доступа к водоснабжению и инфраструктуре. Во-вторых, производство водорода не должно влиять на качество используемого источника воды. Как уже говорилось в Разделе 2, для электролиза воды требуется сверхчистая вода. Независимо от того, являются ли источником воды подземные или поверхностные воды, важно обеспечить, чтобы отходы от производства водорода, такие как рассол или сточные воды от производства материалов PtX, не оказывали неблагоприятного воздействия на качество источника. В тех регионах, где одним из вариантов является опреснение морской воды, крайне важно, чтобы опреснительные установки соответствовали высоким экологическим стандартам, особенно в отношении утилизации рассола. В-третьих, вода также используется в качестве охлаждающей жидкости или для очистки фотоэлектрических установок. Таким образом, необходимо

стремиться к максимальному повышению эффективности использования воды. В целом, сертификация водорода в отношении использования воды должна включать описание происхождения, использования, объемов и рекультивации подходящих источников воды, поверхностных или подземных вод или, при использовании морской воды, описание методов эксплуатации опреснительных установок.

3.2 Механизмы производства водорода и правила устойчивого водопользования

В этом разделе мы рассматриваем три примера различных вариантов удовлетворения критериев устойчивого водопользования. Эти три примера выделяются тем, что в них прямо говорится о воде как ресурсе: Таксономия ЕС, Схема финансирования H2Global и Схема частного сектора - Круглый стол по устойчивым биоматериалам. Были проведены масштабные исследования с целью сравнения существующих схем и правил сертификации водорода. Дополнительную информацию можно найти в следующих публикациях: IEA (2023), TÜV Nord (2023), dena and World Energy Council (2022), GIZ (2021).

Таксономия ЕС

Регламент ЕС о таксономии устанавливает критерии для определения экологически устойчивых видов экономической деятельности и поощряет частные инвестиции в экологичные и устойчивые проекты в поддержку Европейского зеленого курса (EU, 2021). Он способствует последовательному и четкому пониманию деятельности, которая считается экологически устойчивой. Шесть экологических целей ЕС в рамках Таксономии ЕС включают смягчение последствий изменения климата, адаптацию к изменению климата, устойчивое использование и защиту водных и морских ресурсов, переход к экономике замкнутого цикла, предотвращение и контроль загрязнения, а также защиту и восстановление биоразнообразия и экосистем.

В Таксономии ЕС водород упоминается в производственном и энергетическом секторах (Главы 3 и 4) и включен в следующие виды деятельности:

- Изготовление оборудования для производства и использования водорода (стр. 41)
- Производство водорода (стр. 53)
- Производство безводного аммиака (стр. 59)
- Хранение электроэнергии (стр. 75)
- Хранение водорода (стр. 77).

В контексте устойчивого использования и защиты водных и морских ресурсов риски ухудшения состояния окружающей среды связаны с поддержанием качества воды и предотвращением дефицита воды. Такие риски необходимо определить и найти для них решение. Это нужно для обеспечения хорошего состояния воды и хорошего экологического потенциала. Кроме того, после консультаций с соответствующими заинтересованными сторонами, следует разработать план управления водопользованием и защитой воды для тех водных объектов, которые могут потенциально быть затронуты. Если после проведения оценки воздействия на окружающую среду, которая включает оценку и воздействия на водные объекты, будет определено, что выявленные риски устранены, то дополнительная оценка воздействия на водные объекты не потребуется.

H2Global

Инструмент H2Global помогает внедрять и использовать продукты Power-to-X (PtX) на основе рыночного подхода. (H2Global, дата не указана). H2Global функционирует как основанный на конкуренции инструмент, задача которого — способствовать быстрому и эффективному расширению рынка PtX на промышленном уровне. В основу этой модели положена методика контрактов на разницу (КНР), при этом разница между ценами предложения (производство и транспортировка) и спроса компенсируется за счет грантов от финансирующего агентства. Посредник, компания «Хайдроджен интермедиари компани ГмбХ» (Hydrogen Intermediary Company GmbH (HINT.CO)), заключает долгосрочные контракты на поставку со стороны предложения и краткосрочные контракты на продажу со стороны спроса. Цены как на закупки, так и на продажи определяются посредством конкурсных торгов в рамках специально организованного окна финансирования. К целевым «зеленым» продуктам относятся водород, аммиак, метанол и авиационное топливо. Географический охват этого инструмента финансирования может быть региональным (например, Европа) или привязанным к конкретной стране, при этом процесс закупок может быть глобальным. Неотъемлемой частью этой инициативы являются строгие требования к продукции и критерии устойчивости производства, транспортировки и реализации.

Что касается критериев устойчивого развития в области водопользования, то обязательной является комплексная оценка воздействия на окружающую среду и социальную сферу, учитывающая производственные площадки и всю цепочку поставок. Обе оценки должны соответствовать международно признанному стандарту оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС), и участник торгов обязан этот стандарт соблюдать. Во избежание возможного ухудшения качества воды или ее нехватки в течение срока реализации проекта необходимо обеспечить устойчивое

водоснабжение для проектов, отобранных в соответствии с установленными требованиями. В засушливых регионах запрещено использование ископаемых водных ресурсов и питьевой воды. Заявители должны указать источник экологичного водоснабжения, который соответствует этим критериям. Если используется опреснение, то необходимы доказательства устойчивого управления остатками опреснения. Заявителям рекомендуется изучить другие варианты использования отходов, например, извлечение сырья, и представить концепцию реализации. В процессе опреснения должны использоваться только возобновляемые источники энергии, а техническое определение «устойчивого управления» отходами должно быть уточнено в ходе конкурентного диалога.

Круглый стол по вопросам устойчивого обращения с биоматериалами

Круглый стол по устойчивым биоматериалам (RSB) был изначально ориентирован на сертификацию продукции на основе биогенных материалов, но впоследствии расширил сферу своей деятельности, включив в нее возобновляемые виды топлива небиологического происхождения (BBTHП - RFNBO). Эти BBTHП теперь относятся к категории Перспективных Видов Топлива и регулируются «Стандартом RSB для перспективных видов топлива», в котором изложено 12 принципов, установленных органом по сертификации. Текущая версия стандарта (2.6) вступает в силу с 1 декабря 2023 г. В ней отдельно рассматриваются водород, синтез-газ и синтетическое жидкое топливо, как это указано в Приложении II. (RSB, 2023a). Основное аудиторией этого стандарта являются производители, производственный сектор и потребители, за исключением транспортного сектора.

Процесс сертификации RSB для BBTHП проходит в соответствии с 12-ю принципами, заложенными в «Стандарте RSB для перспективных видов топлива». (RSB, 2023b). Эти принципы касаются ряда вопросов, включая права человека и трудовые права, сельское и социальное развитие, местную продовольственную безопасность, права на землю и воду. В частности, в стандарте RSB изложены комплексные критерии использования воды, включающие четыре ключевых пункта: 1. В ходе производственной деятельности необходимо соблюдать существующие права на воду местных общин и коренных народов. 2. Для обеспечения эффективного использования воды и поддержания или улучшения качества водных ресурсов необходимо разработать план управления водными ресурсами и соблюдать его в ходе производственной деятельности. 3. Производственная деятельность не должна приводить к истощению ресурсов поверхностных или подземных вод сверх возможностей их восполнения. 4. Производственная деятельность должна активно способствовать повышению или поддержанию качества ресурсов поверхностных и подземных вод.

4 Водный комплекс Казахстана

Казахстан – засушливая и водозависимая страна. Фактически, на Евразийском континенте это одна из стран с самым сильным дефицитом воды. (Rivotti et al., 2019). К 2030 году объемы пресной воды сократятся в 5 раз и составят 23 км³, что соответствует текущему годовому уровню потребления (Чунубаева, 2023). Некоторые районы страны, включая ее столицу Астану, испытывают острую нехватку воды. Вот тот контекст, в котором мы даем обзор водных ресурсов Казахстана, политики управления водными объектами и проблем, с которыми сталкивается этот регион.

4.1 Состояние водных объектов Казахстана

Общий объем возобновляемых водных ресурсов Казахстана составляет около 108,4 км³/год. (ФАО, дата не указана). Основные водные ресурсы Казахстана поступает от поверхностных вод, среднегодовой объем которых составляет 101 км³ (МЭП РК, 2023а). Из них 56% имеют местное происхождение, а остальные 44% поступают с трансграничными реками из Китая, Узбекистана, России и Кыргызстана. Как показано на Рис. 3, в Казахстане 8 водно-хозяйственных бассейнов: Арало-Сырдарьинский, Балхаш-Алакольский, Иртышский, Ишимский, Урало-Каспийский, Нура-Сарысу, Шу-Таласский и Тобол-Торгайский бассейны (Issanova et al., 2018). Доступность водных ресурсов в этих восьми основных речных бассейнах очень неравномерна: 75% всех образующихся водных ресурсов приходится на три крупнейших речных бассейна, а именно Арало-Сырдарьинский, Иртышский и Балхаш-Алакольский. (Karatajev et al, 2017). За последние двадцать лет проблемы управления трансграничными водными ресурсами в Казахстане сильно обострились. Забор воды происходит по всему течению реки, как для промышленности, так и для бытовых нужд (Yunussova and Mosiej, 2016).

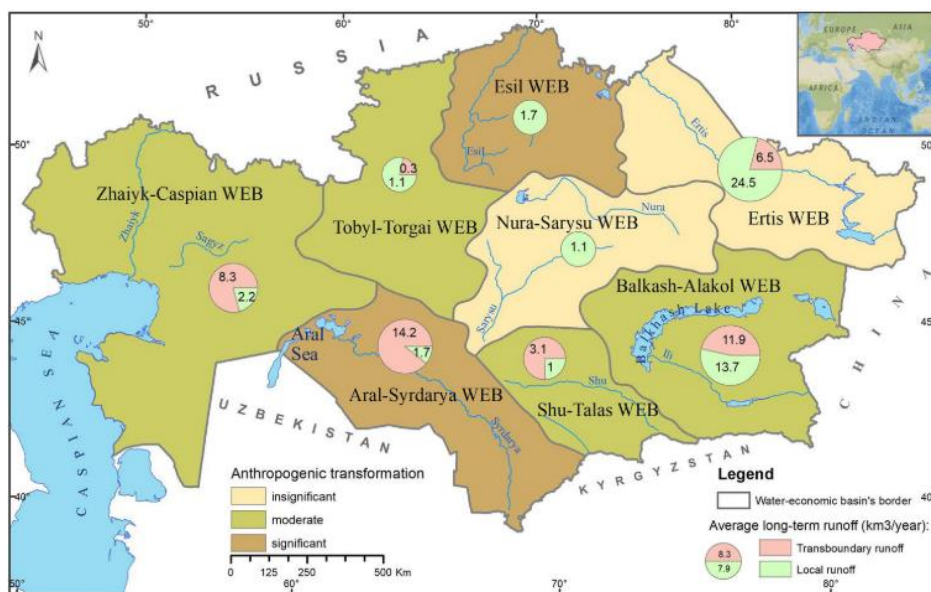


Рисунок 3: Водно-хозяйственные бассейны Казахстана с имеющимися водными ресурсами, более 50% которых формируется за счет трансграничного притока воды.

Источник: Issanova et al. (2018)

Казахстан обладает относительно скудными водными ресурсами, 6 000 м³ в год на душу населения, что значительно меньше, чем в таких регионах, как Северная Европа (43 000 м³ в год на душу населения) (Issanova et al., 2018). В 2022 году объем водозабора в целом для экономики и населения составил 24,96 км³ (МЭП РК, 2023а). Три основных сектора, потребляющих воду, это сельское хозяйство, промышленность и коммунальное хозяйство.

Сельскохозяйственная отрасль, включая регулярное орошение, потребляет в общей сложности 14,2 км³ (11,3 км³) в год, промышленные пользователи забирают в общей сложности 5,99 км³ в год, а коммунальные хозяйства — в общей сложности 1,28 км³ в год. Остальное приходится на для других потребителей. С точки зрения водопотребления, общий водозабор состоит на 96% из поверхностных вод и 4% из подземных вод; небольшой процент приходится на опресненную воду, очищенные сточные воды и воды сельскохозяйственного дренажа (собственные расчеты на основе данных ФАО (дата не указана)). Основная причина малого использования

подземных вод в Казахстане связана с тем, что разрешенные запасы подземных вод не используются. Значительная часть добычи подземных вод происходит на участках недр без утвержденных запасов подземных вод или путем неконтролируемого извлечения (МЭПР РК, 2023а).

4.2 Управление и обращение с водными ресурсами в Казахстане

Казахстан является первопроходцем во внедрении бассейнового подхода к управлению на постсоветском пространстве Центральной Азии (Zhurankhan et al., 2018). В 1993 году был введен в действие Водный кодекс Казахстана, который стал основой водного законодательства Казахстана. Также существует несколько правительственных актов, регулирующих управление водными ресурсами (Genina, 2007). Управление водными ресурсами в Казахстане осуществляется в соответствии с бассейновым принципом комплексного управления водными ресурсами (КУВР)¹. Подчеркнув важность водных ресурсов в стране, президент Касым-Жомарт Токаев учредил Министерство водного хозяйства и ирригации Республики Казахстан (CAREC, 2023). Казахстан внес коррективы в свою институциональную и правовую структуру и тем самым значительно продвинулся во внедрении Комплексного управления водными ресурсами на всех уровнях по сравнению с другими странами ЦАР (Sharipova and Chemayeva, 2022).

Водные ресурсы распределены по территории Казахстана очень неравномерно. Кроме того, Казахстан сильно зависит от водных ресурсов, формирующихся за пределами страны. В связи с этим руководство Казахстана уделяет значительное внимание политике управления водными ресурсами. Её основные направления определяются на высшем политическом уровне и формулируются в стратегических документах и нормативных актах, относящихся к водным ресурсам. Цели политики в области водных ресурсов включают повышение эффективности использования воды, повторное использование и очистку воды, а также увеличение потенциала накопления воды за счет строительства новых водохранилищ. Кроме того, эта политика направлена на повышение уровня обеспеченности населения системами водоснабжения и канализации. (UNECE, 2019).

Статья 34 Водного кодекса подчеркивает значение бассейнового управления в управлении водными ресурсами. Во всех крупных водных бассейнах созданы департаменты по управлению бассейнами, которые находятся на территории соответствующих бассейнов. К концу 2006 года в соответствии со статьей 43 Водного кодекса и при поддержке ПРООН для всех восьми бассейнов были созданы консультативные органы в форме советов (UNECE, 2016). Основным источником финансирования советов является государственный бюджет. Однако финансовая поддержка правительства лишь с трудом покрывает затраты на организацию ежегодных собраний всех восьми бассейновых советов. Большинство советов по-прежнему не располагают финансовыми ресурсами, необходимыми для осуществления конкретных действий помимо проведения регулярных заседаний (UNECE, 2019).

С момента своей первой публикации в 1993 году в Водный кодекс несколько раз вносились поправки. Например, в 2014 году в Водный кодекс были внесены изменения, касающиеся безопасности гидротехнических сооружений. Нескольким комитетам Министерства сельского хозяйства были даны важные компетенции в области окружающей среды, включая водные ресурсы. Целью Комитета по водным ресурсам является координация реализации государственной политики в сфере водного хозяйства, а также регулирование и контроль в сфере водного хозяйства (Министерство водных ресурсов и ирригации РК, дата не указана). Комитет столкнулся с такими проблемами, как внутренний конфликт интересов из-за своей тесной связи с сельскохозяйственной отраслью как одним из ключевых водопользователей, а также сокращение фактического штата сотрудников Комитета с 2014 года. Территориальные органы Комитета — это 8 инспекций в соответствующих бассейнах. Эти бассейновые инспекции контролируют использование и охрану водных ресурсов и отвечают за комплексную систему управления водными ресурсами. Кроме того, бассейновые инспекции координируют использование воды в границах бассейна, реализуют бассейновые соглашения и поддерживают деятельность бассейновых советов. Однако в определенной степени бассейновым инспекциям не хватает опыта по конкретным темам, таким как безопасность гидротехнических сооружений, и они сильно недоукомплектованы кадрами. Например, в Нура-Сарысуйском бассейне площадью около 139 000 км² надзор над всей территорией ведут всего 4 инспектора (UNECE, 2019).

Кроме того, существует Департамент трансграничных рек, являющийся отдельной структурой в составе Министерства сельского хозяйства. Он отвечает за двусторонние водные корпорации Казахстана с Кыргызстаном, Китаем и Российской Федерацией. Департамент также отвечает за многостороннее сотрудничество, такое как Международный фонд спасения Аральского моря (МФСА) и его Межгосударственная координационная водохозяйственная комиссия (МКВК). (UNECE, 2019). Основными органами управления водными ресурсами в

¹ <https://www.gwp.org/en/gwp-SAS/ABOUT-GWP-SAS/WHY/About-IWRM/>

бассейнах являются территориальные советы, которые взаимодействуют с местными органами власти, а также Комитет по водным ресурсам. Эти органы играют важную роль в вопросах приватизации и законодательных процессах в бассейнах. За эксплуатацию гидротехнических сооружений, включая гидроузлы, водозаборы, насосные станции и т.д., отвечают исключительно государственные предприятия. (Sarsenbekov and Ahmetov, дата не указана).

4.3 Сложности управления водными ресурсами в Казахстане

Одной из проблем, которую надо решать Казахстану, является потеря воды при транспортировке. Потери или утечки при транспортировке воды составляют 13% от общего объема водозаборов в 2022 году. Наибольшая доля забора воды приходится на сельское хозяйство, особенно на регулярное орошение, где потери достигают 65% воды, потребляемой этой отраслью (МЭПР РК, 2023а). Казахстан также испытывает трудности с качеством воды из-за первичного загрязнения промышленными предприятиями, что является серьезной экологической угрозой (Issanova et al., 2018). Огромный ущерб окружающей среде наносит добыча ископаемого топлива, особенно угля, т.к. её сопровождают дренаж, выбросы и пыль. Открытая добыча дополнительно обостряет такие проблемы, как землепользование, хвостохранилища и кислотный дренаж (UNEP, 2019).

Еще одной проблемой для Казахстана и региона Центральной Азии является ожидаемый рост численности населения. По мере роста населения проблема нехватки воды в Центральной Азии будет становиться все более острой. В настоящее время в регионе проживают 100-120 млн человек, а к 2050 году это число может увеличиться до 150 млн (PAN, 2021). К 2040 году население Казахстана вырастет примерно на 15% и составит 22 млн человек (Всемирный банк, 2016). Ожидается, что в сочетании с миграцией из сельской местности в города это окажет дополнительную нагрузку на использование воды и инфраструктуры водоснабжения в Казахстане (Zhurankhan et al., 2018).

Климатические прогнозы говорят о повышении средних температур в стране, причем к 2050 году ожидается рост на 3-4 °C. В Центральной Азии, включая Казахстан, с 1970-х годов температура росла в два раза быстрее, чем в среднем по миру. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) прогнозирует дальнейшее повышение температуры в регионе на 2-4 °C к 2050 году и на 3-5 °C к 2080 году (Lioubimtseva and Henebry, 2009; Lutz et al., 2013). При прогнозируемом изменении климата в основных бассейнах страны ожидается сокращение местного стока на 10-20%, сопровождаемое увеличением повторяемости маловодья и катастрофических наводнений. В связи с уменьшением трансграничного стока ожидается дальнейшее сокращение имеющихся водных ресурсов республики до 77 км³/год к 2040 году (МЭПР РК, 2023а). Оценка уязвимости к изменению климата выявила, что из всех восьми основных водных бассейнов наиболее уязвимы Алматинская, Южно-Казахстанская, Северо-Казахстанская и Жамбылская области. (FAO, 2017). Что касается осадков, в Казахстане прогнозируется уменьшение количества осадков в летний сезон и увеличение зимой и весной (Chepelianskaia and Sarkar-Swaisgood, 2022). Это повысит риск наводнений, оползней, селей и селевых потоков, особенно в горных районах, а также летних засух. В отношении осадков, в Казахстане прогнозируется уменьшение количества осадков в летний сезон и увеличение зимой и весной (Gafurov et al., 2022). Также исследователи внимательно следят за Каспийским морем, где, согласно прогнозам, в ближайшие десятилетия уровень воды значительно упадет из-за увеличения испарения, которое не уравновешивается увеличением речного стока или осадков. (Kaleji, 2023). На повестке дня в Казахстане стоят меры по адаптации к изменению климата. Страна реализует комплексные стратегии управления водными ресурсами, в том числе строительство водохранилищ и аварийных резервуаров для сбора избыточных осадков, модернизация и реконструкция водоканалов и гидротехнических сооружений, проекты очистки сточных вод и внедрение современных методов орошения, а также планы по стимулированию использования водных ресурсов, водосберегающие технологии в промышленном, сельскохозяйственном и жилищном секторах (МЭПР РК, 2023б).

5 Как производство водорода повлияет на водные ресурсы Казахстана

Основой энергетического сектора Казахстана в настоящее время являются нефть, каменный уголь и природный газ, которые страна как добывает, так и экспортирует. Основу электроэнергетической отрасли составляют угольные ТЭС – в 2019 году их доля выработки электроэнергии достигла 70%; доля газовых ТЭС составила почти 20%, а остальные 10% произвели крупные гидроэлектростанции и новые ВИЭ (UNECE, 2023). Энергетический ландшафт Казахстана претерпевает значительные изменения, вызванные стратегическими политическими решениями и инициативами. Одной из наиболее важных целей, определяющих энергетическую траекторию страны, является ее твердое намерение достичь углеродной нейтральности к 2060 году. Это обязательство было официально закреплено в сентябре 2021 года с принятием Стратегии достижения углеродной нейтральности к 2060 году, что свидетельствует о глубоком осознании проблемы изменения климата в Казахстане. 2 февраля 2023 года действующий президент Казахстана Касым-Жомарт Токаев утвердил Стратегию достижения углеродной нейтральности к 2060 году, которая устанавливает амбициозные цели по нулевому выбросу углерода для декарбонизации страны². Кроме того, в соответствии со своими международными обязательствами по Парижскому соглашению, Казахстан также обозначил свой Определяемый на национальном уровне вклад (ОНУВ). В редакции от июня 2023 года ОНУВ включает цель по сокращению выбросов парниковых газов на 15-25% к 2030 году по сравнению с уровнями 1990 года и уделяет приоритетное внимание, среди прочего, управлению водными ресурсами (МЭПР РК, 2023b). В соответствии с ОНУВ Казахстана, 29 июля 2020 года Правительство утвердило План действий по реализации Концепции перехода Республики Казахстан к «зеленой экономике» на 2021-2030 годы (План действий на 2021-2030 годы). В Плане действий на 2021-2030 годы предписан ряд мер, связанных с адаптацией к изменению климата³, в том числе снижение интенсивности водопользования, преобразование сельского хозяйства, повышение энергоэффективности, модернизация жилья и муниципальных услуг, развитие экологически безопасного транспорта, сохранение экосистем и увеличение лесного покрова.

По состоянию на декабрь 2023 года Казахстан активно работает над Национальной водородной стратегией. И хотя точные сроки ее утверждения еще не объявлены, эта инициатива демонстрирует намерение страны перевести свою экономику на устойчивую траекторию. В данном разделе рассматривается влияние производства водорода на водные ресурсы Казахстана и проводится анализ производства зеленого водорода по двум сценариям на 2040 год.

5.1 Сценарии производства зеленого водорода

Основным документом, формулирующим политику страны в области энергетики, является Стратегия достижения углеродной нейтральности к 2060 году. В ней описываются два контрастных сценария: базовый сценарий и сценарий углеродной нейтральности. В базовом сценарии, с 2017 по 2040 год производство электроэнергии из возобновляемых источников, включая гидроэнергетику, должно вырасти в 2,2 раза (15,6 ТВтч). Сценарий углеродной нейтральности дает принципиально иной прогноз: почти пятнадцатикратное увеличение производства электроэнергии из возобновляемых источников (161 ТВтч) за тот же период.

Следуя методологии, подобной тому, что описывает UNECE (2023), наш анализ рассматривает два сценария, консервативный и оптимистичный. Согласно консервативному сценарию, для производства зеленого водорода будет использовано около 3,12 ТВтч возобновляемой электроэнергии, или 20% от прироста солнечной и ветровой энергии до 2040 года. Если исходить из общей длительности работы в течение 4 000 часов, это соответствует установленной мощности электролизера в 780 МВт. И наоборот, в оптимистичном сценарии для производства зеленого водорода будет использовано около 96,6 ТВтч возобновляемой электроэнергии, или 60% от прироста солнечной и ветровой энергии до 2040 года. Это также соответствует установленной мощности электролизеров около 24 ГВт. Предполагается, что в обоих сценариях для производства водорода путем электролиза потребуется около 52 кВтч/кг.

² <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121>

³ <https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/Government%20Decree%20No%20479%20of%202020%20%28RU%29.pdf>

Результаты этих сценариев представлены на Рис. 4. Анализ по консервативному сценарию показывает объем производства водорода около 0,6 млн тонн, а по оптимистическому сценарию — около 1,8 млн тонн в 2040 году.

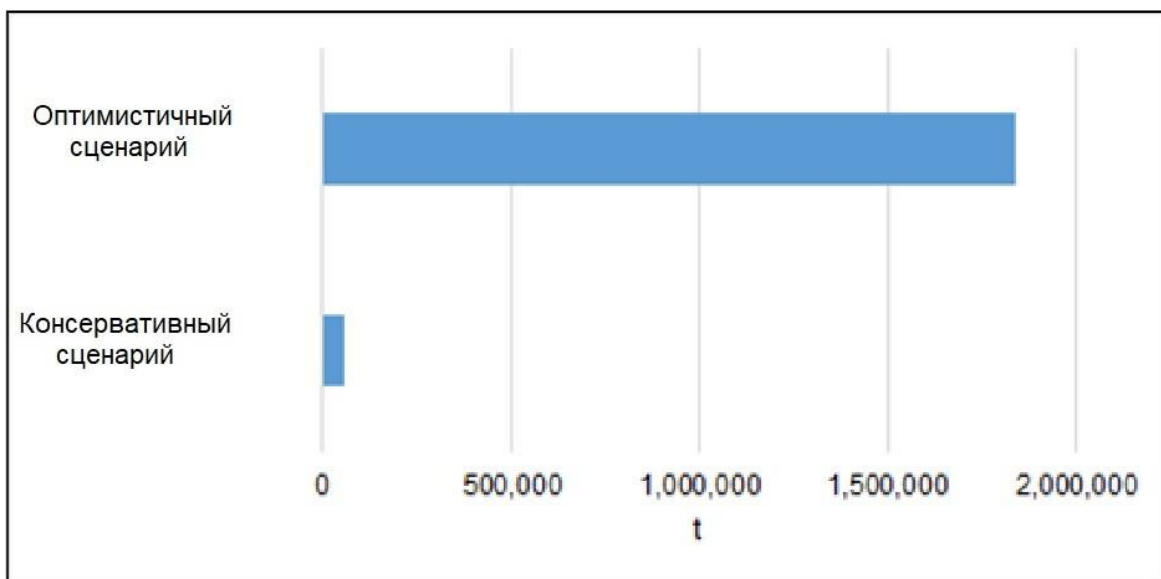


Рисунок 4: Согласно углеродной нейтральности, в 2040 году объем производства водорода в Казахстане может составить около 1,8 млн тонн.

5.2 Объемы воды, необходимые для производства водорода

В этом разделе, чтобы сделать предположение о воздействии на водные ресурсы Казахстана, мы более подробно рассматриваем интенсивность забора воды ПМ-электролизерами и щелочными электролизерами для производства такого количества водорода, которое необходимо для двух сценариев из предыдущего раздела. Как показано в Разделе 2.2, средние значения интенсивности водозабора для ПМ-электролизеров и щелочных электролизеров составляют около 25,7 л H₂O/кг H₂ и 32,2 л H₂O/кг H₂, соответственно. С учетом таких интенсивностей водозабора, для консервативного сценария объем воды, необходимый для производства водорода, составляет 1,5 млн м³ для ПМ-электролиза и 1,9 млн м³ для щелочного электролиза, что составляет 0,006% и 0,008% от общего водозабора Казахстана в 2022 году. При оптимистическом сценарии, водозабор для ПМ-электролиза составляет 47,2 млн м³, а для щелочного электролиза – 59,1 млн м³, что составляет 0,19% и 0,24% от общего водозабора Казахстана в 2022 году. Сравнение оптимистического сценария с текущим водозабором по секторам, данное в Разделе 4.1, показано в логарифмическом масштабе на Рис. 5.

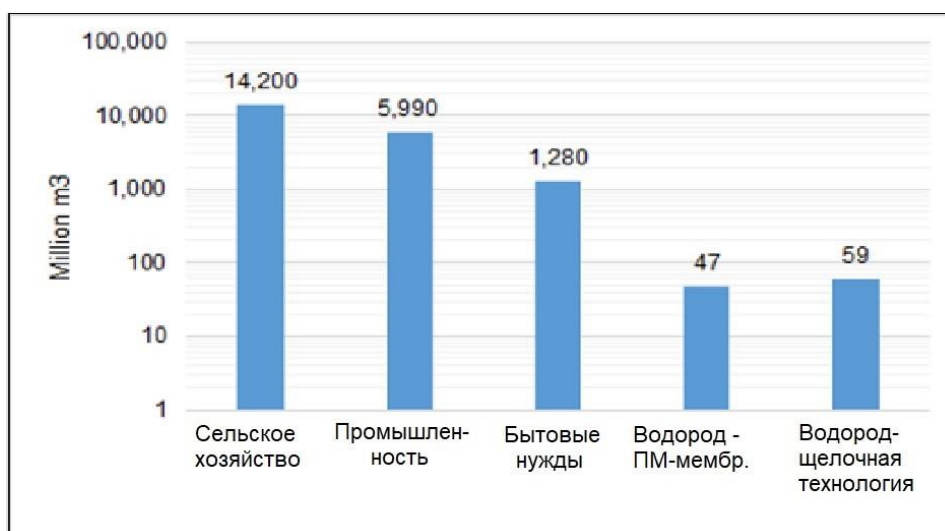


Рисунок 5: По сравнению с другими водопользователями (представлены в логарифмическом масштабе), воздействие этих пользователей на водные ресурсы относительно невелико, но его необходимо оценивать в каждом конкретном случае, поскольку водные ресурсы сильно зависят от доступности на местах.

Анализ показывает, что, хотя общее воздействие производства водорода на водные ресурсы в Казахстане может показаться относительно небольшим по сравнению с другими водопользователями, необходимо изучить этот вопрос более подробно. Решающим фактором является региональное распределение водных ресурсов Казахстана. Здесь существуют значительные диспропорции. «Атлас водных рисков» программной платформы Aqueduct Института исследования мировых ресурсов, представленный на Рис. 6, дает хорошее предварительное представление о том, где в Казахстане наблюдается наибольший дефицит воды. Эти региональные различия требуют тщательной оценки местных водных ресурсов для принятия обоснованных решений об осуществимости и устойчивости проектов производства водорода в конкретных регионах.

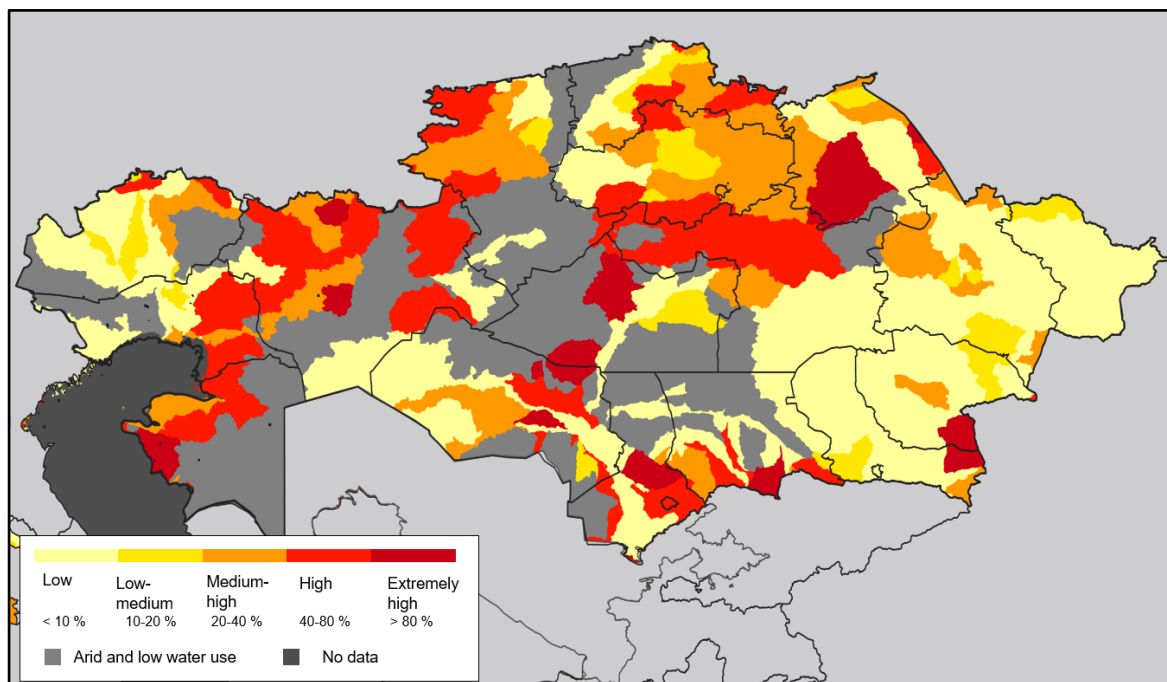


Рисунок 6: Важнейшим фактором при оценке производства водорода в Казахстане является распределение воды на местном уровне. Производство зеленого водорода невозможно без достаточных водных ресурсов.

Собственная иллюстрация на основе (<https://www.wri.org/data/aqueduct-global-maps-30-data>)

В районах с обильными водными ресурсами производство водорода может быть организовано с минимальным воздействием на местные водные системы. Однако в тех регионах, где наблюдается нехватка воды или другие проблемы, жизненно важно внедрять методы стратегического управления водными ресурсами, чтобы обеспечить устойчивое производство водорода без обострения существующих проблем, связанных с водой. Поэтому для создания прочной основы для планов по производству водорода в Казахстане принципиально важно понимать местный контекст.

5.3 Дискуссии вокруг последствий производства водорода

Анализ, представленный в предыдущем разделе, подчеркивает относительно скромное влияние производства водорода на общий водозабор даже в оптимистическом сценарии. Однако необходимо осознавать, что у водных ресурсов Казахстана существуют значительные региональные различия. В связи с этим необходимо провести более детальную оценку с упором на потребление воды, особенно в цепочке создания стоимости производства водорода, и количественную оценку водного баланса на уровне водного бассейна и водных объектов, включая озера и реки. Это требует более детального и индивидуального подхода, который учитывает уникальные местные особенности конкретного региона.

Переход к водородной экономике дает Казахстану возможность сократить потребление воды и уменьшить ее дефицит по сравнению с водоемким производством энергии с использованием угля. В связи с тем, что Казахстан сейчас рассматривает этот переход, важно признать региональные различия в доступности и потреблении воды.

Поэтому необходимо проводить активную политику по защите существующих водных ресурсов. Для обеспечения ответственного и устойчивого использования существующих водных ресурсов необходима эффективная политика. Таким образом, все субъекты, участвующие в реализации водной политики на правительственном уровне, такие как Министерство энергетики (энергетический сектор), Министерство промышленности и инфраструктурного развития (промышленное развитие), Министерство экологии и природных ресурсов (охрана окружающей среды) и Министерство национальной экономики (стратегическое планирование экономики), должны активно сотрудничать.

Кроме того, необходимо укреплять сотрудничество с соседними странами в регионе, чтобы решить проблему зависимости Казахстана от притока трансграничных вод. Поэтому необходимо реализовывать существующие стратегии, такие как План действий на 2021-2030 годы, который уже предусматривает сотрудничество с Центральной Азией. План действий включает поддержку Центральноазиатской региональной программы по адаптации к изменению климата, реализацию соглашений о защите качества воды, а также совместному использованию и охране трансграничных рек.

6 Заключение

В заключение следует подчеркнуть, что устойчивое использование воды играет важную роль в производстве водорода. Для производства 1 кг водорода требуется от 15 до 30 кг воды, в зависимости от источника воды и технологии электролиза. Чтобы получить действительно экологически чистый водородный продукт, в ходе сертификации водорода по параметру «использование воды» необходимо указать происхождение, использование, объемы и рекультивацию подходящих источников воды, поверхностные или подземные воды или, в случае морской воды, методы эксплуатации опреснительных установок.

В ближайшие годы Казахстану будет необходимо готовить свою систему управления водными ресурсами к решению задач, которые перед ним встанут в будущем. Основными проблемами водного хозяйства Казахстана являются потери воды при транспортировке из-за износа инфраструктуры, неэффективное использование воды, например, в сельскохозяйственной отрасли для орошения, а также рост температуры и усиление сдвигов в осадках, вызванные изменением климата.

В связи со стремлением Казахстана к водородной экономике крайне важно проделать оценку воздействия производства зеленого водорода на окружающую среду. В рамках такой комплексной оценки следует указать, как используется вода на каждом из этапов цепочки создания стоимости в производстве водорода, и дать количественное определение водного баланса на уровне водных бассейнов и водных объектов, включая озера и реки. Это потребует индивидуального подхода, который учитывает уникальные местные особенности конкретного региона.

Предполагаемый переход на водородную экономику открывает новые возможности, но при этом требует эффективной политики в отношении водных ресурсов. Для обеспечения ответственного и устойчивого использования существующих водных ресурсов жизненно важно наладить сотрудничество между государственными органами, такими как Министерство энергетики, Министерство промышленности и развития инфраструктуры, Министерство экологии и природных ресурсов и Министерство национальной экономики. В рамках этого сотрудничества необходимо оптимизировать политику, направленную на решение потенциальных конфликтов по поводу водопользования, особенно в тех отраслях, где применяются водоемкие процессы.

Для преодоления угрозы нехватки воды в Казахстане нужна комплексная модель рационального использования водных ресурсов для всего Центрально-Азиатского региона. Признавая, что в будущем поставок воды из соседних стран может оказаться недостаточно, необходимо разработать комплексный и согласованный подход со стороны всего Центрально-Азиатского региона. Большое значение для решения проблем с нехваткой воды имеет сотрудничество между странами Центральной Азии. Это сотрудничество должно быть направлено на повышение эффективности использования воды, модернизацию систем ирригации и внедрение передовых технологий в рамках инициативы по управлению водными ресурсами.

Глобальная природа нехватки воды требует международного внимания и согласованных усилий. Помимо признания серьезности самой проблемы, первостепенное значение имеет твердая решимость наращивать потенциал и оптимальная организация глобальных инициатив. Чтобы расширить возможности местных сообществ, внедрить методы устойчивого управления водными ресурсами и повысить устойчивость к последствиям нехватки воды, необходимы совместные усилия и общая ответственность государств.

ИСТОЧНИКИ

Becker, H. et al. (2023) 'Impact of impurities on water electrolysis: a review', *Sustainable Energy & Fuels*, Issue 7, pp. 1565-1603. doi: <https://doi.org/10.1039/D2SE01517J>.

Bracker, J. (2017) *An outline of sustainability criteria for synthetic fuels used in transport*. Доступно по адресу: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Sustainability-criteria-for-synthetic-fuels.pdf> (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Chepelianskaia, O. and Sarkar-Swaigood, M. (2022) *Kazakhstan Climate Change and Disaster Profile*. Доступно по адресу: <https://www.unescap.org/kp/2022/kazakhstan-climate-change-and-disaster-risk-profile> (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Chunymbaeva, B. (2023) *The water crisis in Central Asia - how to find solutions?* Доступно по адресу: <https://caneecca.org/en/the-water-crisis-in-central-asia-how-to-find-solutions/> (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Commission Delegated Regulation (EU) 2021/2139 (2021) Доступно по адресу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R2139> (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) (2021) Requirements for the production and export of green-sustainable hydrogen. Доступно по адресу: https://bst.de/wp-content/uploads/2022/02/Study_CHL_Production_of_green_sustainable_hydrogen_final.pdf (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Environmental Centre for Central Asia (CAREC) (2023) *The Ministry of Water Resources and Irrigation has been established in Kazakhstan*. Доступно по адресу: <https://centralasiacclimateportal.org/the-ministry-of-water-resources-and-irrigation-has-been-established-in-kazakhstan/> (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2017) *Drought characteristics and management in Central Asia and Turkey*. Доступно по адресу: https://www.droughtmanagement.info/literature/FAO_Drought_characteristics_and_Management_in_Central_Asia_Turkey_2017.pdf (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (дата не указана) *Aquastat*. Доступно по адресу: <https://data.apps.fao.org/aquastat/?lang=en> (Дата последнего обращения: 21 июня 2023).

Gafurov, A. et al. (2022) 'Water resources and water security in Central Asia', Policy Briefs of the Green Central Asia Initiative. doi: <https://doi.org/10.48440/GCA.2022.003>.

Genina, M. (2007) 'The Development of a New Water Code in the Republic of Kazakhstan' *Politikon: The IAPSS Journal of Political Science*, 13(1), pp. 21–31. <https://doi.org/10.22151/politikon.13.1.2>.

German Energy Agency (dena) and World Energy Council (2022) *Global Harmonisation of Hydrogen Certification*. Доступно по адресу: https://www.weltenergieerat.de/wp-content/uploads/2022/01/dena_WEC_Harmonisation-of-Hydrogen-Certification_digital_final.pdf (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

H2Global (no date) *The H2Global Instrument*. Доступно по адресу: <https://www.h2global->

stiftung.com/project/h2g-mechanism (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Heinemann, C. and Mendelevitich, R. (2021) *Sustainability dimensions of imported hydrogen*. Oeko-Institut Working Paper 8/2021. Доступно по адресу: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-imported-hydrogen.pdf> (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

International Energy Agency (IEA) (2022) *Kazakhstan 2022 Energy Sector Review*. Доступно по адресу: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/fc84229e-6014-4400-a963-bccea29e0387/Kazakhstan2022.pdf> (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

International Energy Agency (IEA) (2023) *Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity*. Доступно по адресу: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/acc7a642-e42b-4972-8893-2f03bf0bfa03/Towardshydrogendefinitionsbasedontheiremissionsintensity.pdf> (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

IRENA and Bluerisk (2023) *Water for hydrogen production*. Доступно по адресу: https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Dec/IRENA_Bluerisk_Water_for_hydrogen_production_2023.pdf?rev=7e9c17aa097340f4834f7df1c710ca72 (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Issanova, G. et al. (2018) 'Water availability and state of water-economic basins in Kazakhstan', *Paddy and Water Environment*, 16, pp. 183-191. doi: <http://doi.org/10.1007/s10333-018-0630-6>.

Kaleji, V. (2023) *Decreasing Water Levels in the Caspian Sea: Causes and Implications*. Доступно по адресу: <https://www.cacianalyst.org/publications/analytical-articles/item/13769-decreasing-water-levels-in-the-caspian-sea-causes-and-implications.html> (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Karatayev et al. (2017) 'The water-energy-food nexus in Kazakhstan: challenges and opportunities', *Energy Procedia*, 125, pp. 63-70. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.064>.

Lioubimtseva, E. and Henebry G. (2009) 'Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations', *Journal of Arid Environments*, 73(11), pp. 963-977. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.04.022>.

Lutz, A. (2013) 'Comparison of climate change signals in CMIP3 and CMIP5 multi-model ensembles and implications for Central Asian glaciers', *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(9), pp. 3661-3677. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-17-3661-2013>.

Министерство экологии и природных ресурсов Республики Казахстан (МЭПР РК) (2023а) *Национальный доклад о состоянии окружающей среды и использовании природных ресурсов Республики Казахстан*. Доступно по адресу: <https://ecogofond.kz/wp-content/uploads/2023/12/NDSOS-2022-RUS-gotov1-1.pdf> (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Министерство экологии и природных ресурсов Республики Казахстан (МЭПР РК) (2023б) *Обновленный определяемый на национальном уровне вклад Республики Казахстан в глобальные меры реагирования на изменение климата*. Доступно по адресу: https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2023-06/12updated%20NDC%20KAZ_Gov%20Decree313_19042023_en_cover%20page.pdf (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Министерство водных ресурсов и ирригации Республики Казахстан (МВРИ РК) (дата не указана) *Общие сведения*. Доступно по адресу: <https://www.gov.kz/memleket/entities/water/about?lang=en> (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023)

Nationaler Wasserstoffrat (NWR) (2021) *Sustainability criteria for import projects for renewable hydrogen and PtX products*. Доступно по адресу: https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/EN/2021-10-29_NWR-Position_Paper_Sustainability_Criteria.pdf (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Onissiphorou, K. (2022) *What Is Ultrapure Water?* Доступно по адресу: <https://www.chemicals.co.uk/blog/what-is-ultrapure-water> (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

PtX Hub (2022) *PtX. Sustainability Dimensions and Concerns*. Доступно по адресу: <https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2022/05/PtX-Hub-PtX.Sustainability-Dimensions-and-Concerns-Scoping-Paper.pdf> (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Rivotti, P. et al. (2019) 'Impact of future energy policy on water resources in Kazakhstan', *Energy Strategy Reviews*, 24, pp. 261-267. doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.04.009>.

Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB) (2023a) *RSB Standard for Advanced Fuels*. Доступно по адресу: https://rsb.org/wp-content/uploads/2020/06/RSB-STD-01-010-RSB-Standard-for-advanced-fuels_v2.6.pdf (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB) (2023b) *RSB Principles & Criteria*. Доступно по адресу: https://rsb.org/wp-content/uploads/2020/06/RSB-STD-01-001-PC-v4.0_final-1.pdf (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Saravia, F. et al. (2023) *Genügend Wasser für die Elektrolyse*. Доступно по адресу: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/h2o-fuer-elektrolyse-dvgw-factsheet.pdf> (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Sarsenbekov, T. and Ahmetov, S. (no date) *Report on Regional Waterpartnership (Republic of Kazakhstan)*. Доступно по адресу: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cacena_files/en/pdf/kazakhstan.pdf (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Schmidt, R. and Frank, D. (2023) *GreeN-H2 Namibia*. Доступно по адресу: [https://dechema.de/green_h2_feasibility_study/ /report%20seawater%20brine%20treatment%20and%20odisposal%20in%20Namibia%20\(1\).pdf](https://dechema.de/green_h2_feasibility_study/ /report%20seawater%20brine%20treatment%20and%20odisposal%20in%20Namibia%20(1).pdf) (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Sharipova, B. and Chemayeva, N. (2022) 'Adaptive water governance in Central Asia: Un-puzzling the concept', *Central Asian Journal of Water Research*, 8(2), pp. 1-18. doi: <https://doi.org/10.29258/CAJWR/2022-R1.v8-2/1-18.eng>

Terrapon-Pfaff, J. et al. (2020) 'Water Demand Scenarios for Electricity Generation at the Global and Regional Levels', *Water*, 12(9), doi: <https://doi.org/10.3390/w12092482>.

TÜV Nord (2023) *Expert Opinion 'Certification and Guarantees of Origin for imported green hydrogen and PtX products'*. Доступно по адресу: https://files.h2-global.de/H2G_TUEV-Nord_Certification-and-Guarantees.pdf (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) (2016) *Implementation of basin management principle in Eastern Europe, the Caucasus and Central Asia*. Доступно по адресу: https://unece.org/DAM/env/water/meetings/NPD_meetings/Publications/benchmarking-2016-EN.pdf

(Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) (2019) *Environmental Performance Reviews Kazakhstan, Third Review*. Доступно по адресу: https://unece.org/sites/default/files/2021-08/ECE_CEP_185_Eng_0.pdf (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) (2023) *Sustainable Hydrogen Production Pathways in Eastern Europe, the Caucasus and Central Asia*. Доступно по адресу: https://unece.org/sites/default/files/2023-03/EN_Sustainable%20Hydrogen%20Production%20Pathways_final_0.pdf (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

World Bank (2022) *Country Climate and Development Report: Kazakhstan*. Доступно по адресу: <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/e91f4c4e-a61b-507d-bb91-a39c5ad2f499/content> (Дата последнего обращения: 21 декабря 2023).

Yunussova, G. and Mosiej, J. (2016) 'Transboundary water management priorities in Central Asia countries – Tobol River case study in Kazakhstan', *Journal of Water and Land Development*, 31, pp. 157–167. doi: 10.1515/jwld-2016-0047.

Zhupankhan, A. et al. (2018) 'Water in Kazakhstan, a key in Central Asian water management', *Hydrological Science Journal*, 63, pp. 752-762. doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1447111>.

