



ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Гриценко Павел Олегович

доцент кафедры энергетических систем, Национальный технический
университет Украины «КПИ имени Игоря Сикорского»
г. Киев, Украина

Аннотация

Современная промышленность находится в центре глобальных усилий по снижению выбросов парниковых газов. Водородная энергия рассматривается как перспективное решение, способное обеспечить экологическую трансформацию промышленного сектора. В статье рассматриваются основные технологии производства, хранения и применения водорода, а также их потенциал в различных отраслях — металлургии, химической промышленности, энергетике. Особое внимание уделено «зелёному» водороду, полученному с использованием возобновляемых источников энергии. Анализируются барьеры и условия, необходимые для масштабного внедрения водородных решений. Делается вывод о роли водорода в достижении климатических целей и декарбонизации промышленности.

Ключевые слова: водородная энергетика, декарбонизация, углеродный след, промышленность, зелёный водород, устойчивое развитие, климатическая нейтральность, энергия.

1. Введение

Глобальные климатические изменения, обусловленные выбросами углерода, требуют комплексных решений для преобразования энергетических систем и промышленности. Водород, как энергоноситель с нулевыми прямыми выбросами углекислого газа, становится важнейшим элементом стратегии по снижению углеродного следа. Его универсальность и высокое содержание энергии делают его особенно привлекательным для тяжёлой промышленности, где трудно заменить ископаемое топливо. Разработка и внедрение водородных технологий является ключом к достижению целей Парижского соглашения и реализации концепции устойчивого развития.

2. Технологии производства водорода

2.1. Серый, голубой и зелёный водород

- **Серый водород** — получают из природного газа путём паровой конверсии метана, сопровождающейся выбросами CO₂.
- **Голубой водород** — аналогично, но с улавливанием и хранением углерода (CCS).
- **Зелёный водород** — производится методом электролиза воды с использованием возобновляемой энергии, что делает его углеродно-нейтральным.

2.2. Электролиз воды

Наиболее перспективная технология — низкотемпературный щелочной или PEM-электролиз. Современные электролизёры обеспечивают КПД 65–75%. Разработка высокотемпературных SOEC-электролизёров также активно продвигается.

3. Применение водорода в промышленности

3.1. Металлургия

В традиционной металлургии восстановление железа сопровождается значительными выбросами CO₂. Использование водорода вместо кокса позволяет получать "зелёную сталь". Пилотные проекты (Hybrit в Швеции, SALCOS в Германии) уже показали эффективность данной технологии.

3.2. Химическая промышленность

Водород используется в синтезе аммиака, метанола, переработке нефти. Переход на зелёный водород может радикально снизить углеродный след этих процессов. Инициативы BASF, Air Liquide и других компаний свидетельствуют о растущем интересе к декарбонизации химических процессов.

3.3. Производство цемента и стекла

Водород способен заменить природный газ и уголь в высокотемпературных печах. Это значительно снижает эмиссии CO₂, образующиеся при сжигании ископаемого топлива.

4. Хранение и транспортировка водорода

4.1. Сжижение и компримирование

Водород можно хранить в сжатом (350–700 бар) или сжиженном виде (-253°C), что требует специальных условий и высоких затрат энергии.

4.2. Металлогидридные и жидкие органические носители

Использование твёрдых материалов или жидкостей для хранения водорода обеспечивает большую безопасность и плотность энергии. Разработка систем ЛОНС и боранов активно продолжается.

5. Углеродный след и экологические преимущества

5.1. Оценка жизненного цикла

Переход на зелёный водород в промышленных масштабах позволяет снизить выбросы парниковых газов до 90%. Пример: для производства 1 тонны стали требуется около 800 кг водорода, что позволяет избежать выброса ~1,8 т CO₂ по сравнению с угольной технологией.

5.2. Влияние на энергетический баланс

Использование водорода в качестве буфера для избыточной энергии ВИЭ (ветер, солнце) позволяет стабилизировать энергосистему и улучшить коэффициент использования возобновляемых источников.

6. Экономические и технологические барьеры

6.1. Стоимость

На 2025 год стоимость зелёного водорода составляет \$3–6 за кг. Для конкурентоспособности она должна снизиться до \$1,5–2/кг. Это требует масштабирования производства, удешевления электролизёров и развития инфраструктуры.

6.2. Инфраструктура

Недостаток водородопроводов, заправок, безопасных резервуаров ограничивает применение. Необходимо инвестировать в создание «водородных коридоров» и адаптацию существующих промышленных сетей.

6.3. Безопасность

Водород легко воспламеняется, требует строгих протоколов хранения и транспортировки. Это требует технической стандартизации и обучения персонала.

7. Перспективы и стратегические направления

7.1. Государственная поддержка

ЕС, Япония, Южная Корея и Китай активно разрабатывают стратегии водородной трансформации. Казахстан, Украина и Узбекистан также включили водород в энергетические дорожные карты.

7.2. Международное сотрудничество

Проекты по экспорту зелёного водорода, например, из Казахстана в Европу, демонстрируют растущий интерес к водородной экономике в СНГ.

7.3. Цифровизация и ИИ

Интеграция цифровых двойников, искусственного интеллекта и автоматизации позволит повысить эффективность водородных систем и минимизировать утечки и потери.

Заключение

Водородная энергетика представляет собой стратегическое направление для глубокой декарбонизации промышленного сектора. При наличии политической воли, инвестиций и научной поддержки водород может стать ключевым элементом промышленного перехода к климатической нейтральности. Особенно важна роль «зелёного» водорода, способного не только снизить углеродный след, но и стать основой новой экономики, устойчивой к вызовам XXI века.

Литература

1. Hydrogen Council. Hydrogen insights 2023.
2. IEA. The Future of Hydrogen. Report for G20. 2021.
3. Bicer Y., Dincer I. Clean hydrogen production from renewable energy: Review and outlook. Int. J. of Hydrogen Energy. 2020.
4. Гусев П.А. Водородные технологии в энергетике и промышленности. — М.: Энергия, 2022.
5. Назарбаев А.А. Зеленый водород в Евразии. Казахстанский энергетический журнал. 2023.
6. Романенко В.В., Смагин И.А. Перспективы водородной энергетики в металлургии. Металлургия XXI века. 2022.
7. KazHydroEnergy. Hydrogen Development Strategy in Kazakhstan. Алматы, 2023.
8. Бочкарёв Е.Н. Энергоэффективность и декарбонизация промышленности. — Киев: Наука, 2021.