

УДК 54.058

## ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ВОДОРОДНАЯ ЛОГИСТИКА: МЕТОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ

Орлов С.А., студент гр. МК3-41Б, II курс

Научный руководитель: Никифоров Д.К., к.ф.-м.н., доцент

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
*г. Москва, Россия*

**Аннотация.** Исследуется роль водородных технологий в декарбонизации транспортных систем, фокусируясь на экологических и экономических аспектах производства и транспортировки водорода. Особое внимание уделено «зелёному» водороду, как ключевому решению для секторов с ограниченными возможностями прямой электрификации. Рассмотрены методы транспортировки и их влияние. Проанализированы выбросы  $\text{NO}_x$  при сжигании водорода в газотурбинных установках, подчеркивая необходимость оптимизации процессов горения. Результаты демонстрируют, что интеграция водородной логистики требует преодоления технологических и инфраструктурных барьеров, но открывает значительные перспективы для достижения климатической нейтральности транспорта.

**Ключевые слова.** водородная логистика, декарбонизация транспорта, зеленый водород, криогенная транспортировка, углеродный след,  $\text{NO}_x$  выбросы, низкоуглеродная энергетика, химические носители, магистральные трубопроводы, климатическая нейтральность.

В настоящее время около 53% выбросов  $\text{CO}_2$  от сжигания топлива приходится на газ и жидкое топливо [6]. В данной ситуации водород играет критическую роль в сокращении выбросов  $\text{CO}_2$  в секторах, где прямая электрификация затруднена: грузовой транспорт, авиация, судоходство. Используя топливные элементы, он обеспечивает нулевые выбросы при высокой энергоёмкости, становясь «мостом» для перехода от ископаемого топлива к климатической нейтральности. Особенно важен «зеленый» водород, производимый из возобновляемых источников, который позволяет полностью исключить углеродный след, формируя основу устойчивой транспортной системы будущего.

Водород классифицируется по методам производства и уровню углеродного следа, что определяет его экологичность и экономическую целесообразность. Основные типы:

*Серый водород* - получается путем парового риформинга метана (SMR) или газификации угля. На его долю приходится около 95% мирового производства. Процесс сопровождается значительными выбросами  $\text{CO}_2$  (10–12 тонн на тонну водорода).

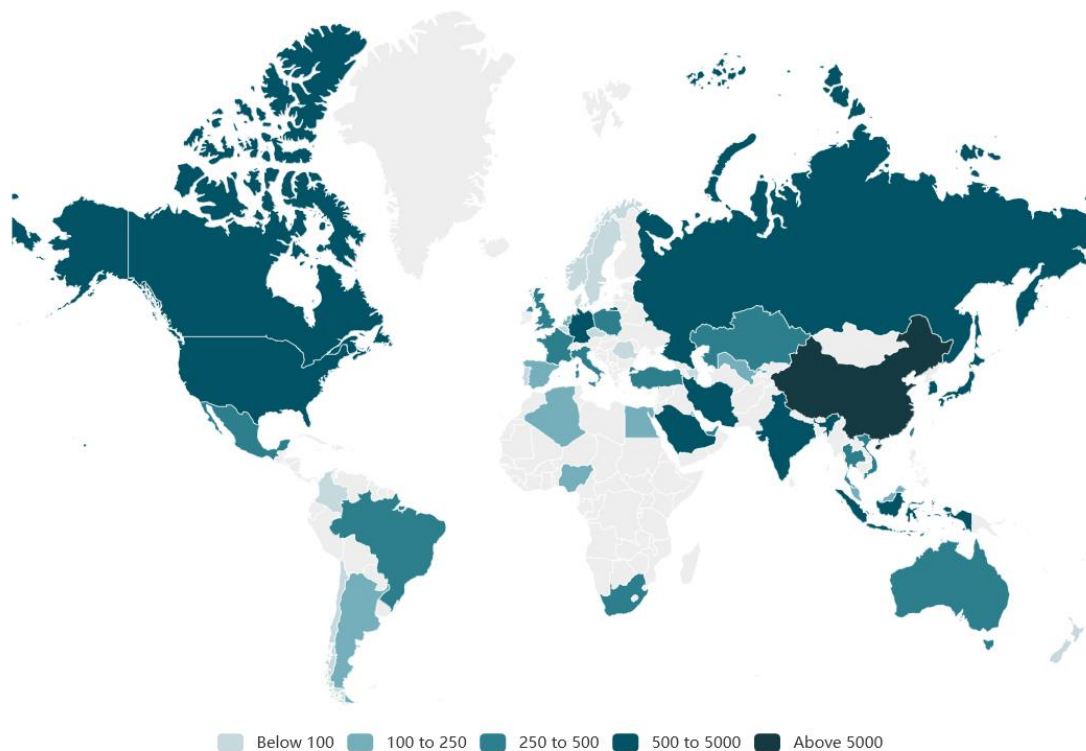


Рис.1. Мировые выбросы миллионов тонн CO<sub>2</sub> по странам за 2023 год.

*Голубой водород* - получается налогично серому, но с улавливанием и хранением углерода (CCS), что снижает выбросы CO<sub>2</sub> на 60–90%. Служит переходным решением для сокращения эмиссии, но зависит от доступности CCS-технологий и инфраструктуры.

*Зеленый водород* - получают через электролиз воды с использованием электроэнергии из ВИЭ (солнечная, ветровая). Нулевые выбросы на всех этапах. Считается «идеальным» для декарбонизации, но доля в мировом производстве - менее 1% (2023 г.).

*Розовый/Фиолетовый водород* - получается путем электролиза на базе атомной энергии. Низкоуглеродный, но вызывает споры из-за рисков ядерной энергетики и радиоактивных отходов.

*Биоводород (биологический)* - получают с помощью генерация водорода микроорганизмами или термохимической переработкой биомассы. Углеродно-нейтральный, но технология находится на ранних стадиях коммерциализации [5].

Таблица.1. Сравнение «цветов» с точки зрения стоимости - выбросов.

| Цвет               | Стоимость(долл.США/кг*ч) | Выбросы(кгCO <sub>2</sub> /кгH <sub>2</sub> ) |
|--------------------|--------------------------|---|
| Серый              | 0,67-1,31                | 8,5   |
| Голубой            | 0,99-2,05                | 1-2   |
| Зеленый            | 2,28-7,39                | 0   |
| Розовый/Фиолетовый | 2,18-5,92                | 0   |

В рассмотрении транспортировки водорода на данном этапе технологического развития рассматривают несколько доступных и эффективных методов.

1. *Магистральные трубопроводы.* Преимущества: высокая пропускная способность, низкие эксплуатационные риски, адаптация существующей газотранспортной сети. Ограничения: высокая капиталоемкость, требования к материалам (риск водородного охрупчивания, коррозия).
2. *Контейнеризация.* Преимущества: отсутствие потерь на испарение, независимость от специализированной инфраструктуры. Недостатки: высокая удельная стоимость логистики, ограниченная массовая производительность.
3. *Криогенная транспортировка.* Преимущества: возможность поставки сжиженного продукта ( $-253^{\circ}\text{C}$ ), потенциал снижения себестоимости при масштабировании. Недостатки: энергоемкость процесса сжижения, паразитные потери на кипение, сложность криогенного цикла (текущие технологические барьеры).
4. *Химические носители.* Преимущества: интеграция с нефтехимической инфраструктурой, безопасность при хранении. Недостатки: необходимость термokatалитической десорбции водорода, дополнительные энергозатраты на регенерацию носителя.

Трубопроводную транспортировку стоит рассматривать как наиболее перспективное решение для формирования глобальной логистики водорода. Данный метод обеспечивает экономически эффективную и экологически устойчивую транспортировку газа на значительные расстояния, что подтверждается долгосрочными прогнозами и текущими инфраструктурными проектами (аммиакопровод «Тольятти-Горловка-Одесса» протяжённостью 2500 км [2].

Касаемо альтернативных методов транспортировки, крупногабаритные перевозчики - морские танкеры и железнодорожные составы - способны интегрировать криогенные резервуары и системы каталитического риформинга, преобразующие жидкие носители в чистый водород. Однако для малогабаритного транспорта требуются иной подход, например использование водородосодержащих веществ с менее сложными условиями хранения и транспортировки.

Особый интерес представляют аммиак ( $\text{NH}_3$ ) и метанол ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), (17,6% и 12,5% массовой доли водорода соответственно) с развитой производственной инфраструктурой. Исследования, подобные проекту «Methanol Blend» компании Volvo, подтверждают значительное снижение выбросов  $\text{CO}_2$  при использовании M15(M18)-смесей в ДВС.[1] Перспективным направлением остаётся каталитическое разложение аммиака в бортовых установках, где эффективность катализаторов на основе рутения уже достигла 99,8% при температурах ниже  $450^{\circ}\text{C}$ . Эти решения, сочетая технологическую зрелость и потенциал для оптимизации, создают основу для поэтапного перехода к водородной экономике.[6]

Таблица 2. Параметры горения веществ

|   | Водород    | Аммиак     | Метанол    | Природный газ |
|---|------------|------------|------------|---------------|
| Температура кипения при 1 атм (°C)                    | -253       | -33.4      | 65         | 25–215        |
| Низшая теплота сгорания (МДж/кг)                      | 120.0      | 45826      | 45677      | 42.9          |
| Предел воспламеняемости (коэффициент эквивалентности) | 0.10 ~ 7.1 | 0.63 ~ 1.4 | 0.55 – 2.9 | 0.7 – 0.4     |
| Адиабатическая температура пламени (°C)               | 2110       | 1800       | 1850       | 2000          |
| Температура самовоспламенения (°C)                    | 520        | 650        | 460        | 190           |
| Максимальная скорость ламинарного горения (м/с)       | 33270      | 0.07       | 0.50       | 0.58          |
| Минимальная энергия воспламенения (МДж)               | 0.02       | 36739      | 0.14       | 0.14          |

Прямое применение водорода ограничено его низкой плотностью энергии и сложностями хранения, что актуализирует разработку водородосодержащих энергоносителей. Ключевые подходы включают: прямое термохимическое преобразование, гибридные углеводородные топлива с оптимизированным C/H-соотношением и каталитический риформинг.

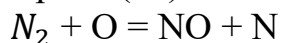
Аммиак (NH<sub>3</sub>), несмотря на выбросы NO<sub>x</sub> и коррозионные риски, обладает уникальным преимуществом - глобальной инфраструктурой производства (180+ млн тонн/год) и транспортировки.

Для газотурбинных систем водородные носители обеспечивают:

1. Политопливность ;
2. синергию с системами SCR (снижение NO<sub>x</sub> на 80–95%);
3. высокую удельную мощность (>400 МВт/м<sup>3</sup>).

Такие установки демонстрируют углеродную интенсивность <0.1 кг CO<sub>2</sub>/кВт·ч, выступая переходным звеном к водородной энергетике в среднесрочной перспективе (5–15 лет).

Негативной особенностью для экологии при использовании ГТУ и водородного топлива это повышение эмиссии NO<sub>x</sub> на фоне снижения выброса CO<sub>2</sub>. Термический NO<sub>x</sub> образуется при высоких температурах (>1300°C) из атмосферного азота (N<sub>2</sub>) и кислорода (O<sub>2</sub>) по механизму Зельдовича:



Для предварительной оценки выброса  $\text{NO}_x$  при максимально возможной температуры ( $\sim 1500^\circ\text{C}$ ) турбины Siemens SGT6-5000F используем уравнение Зельдовича:

$$k = A \cdot T^n \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (1)$$

$k$  - константа скорости реакции;  $A$  - предэкспоненциальный множитель;  
 $E_a$  - энергия активации реакции;  $R$  - универсальная газовая постоянная;  
 $T$  - температура в Кельвинах.

$$\text{NO} = k \cdot [\text{N}_2] \cdot [\text{O}_2]^{0.5} \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2)$$

$[\text{N}_2]$  - концентрация молекулярного азота в зоне горения;  $[\text{O}_2]$  - концентрация молекулярного кислорода.

Таблица 3. Составы разбавленного синтез газа [7]

| Молярный состав, % | Синтез газ | $\text{H}_2$ |
|--------------------|------------|--------------|
| $\text{H}_2$       | 11 - 22    | 30 - 73      |
| $\text{CO}$        | 21 - 34    | 0 - 46       |
| $\text{CO}_2$      | 0 - 4      | 0 - 5        |
| $\text{CH}_4$      | 1 - 11     | 0 - 14       |
| $\text{N}_2$       | 5 - 41     | 0 - 60       |

Таблица 4. Результаты испытаний на сгорание в газогенераторе Siemens SGT6-5000F [7]

| Топливо             | Загрязнитель  | Выбросы, ppm |
|---------------------|---------------|--------------|
| Синтез-газ          | $\text{NO}_x$ | 15           |
|                     | $\text{CO}$   | 10           |
| Чистый $\text{H}_2$ | $\text{NO}_x$ | 15           |
|                     | $\text{CO}$   | 0            |
| Природный газ       | $\text{NO}_x$ | 25           |
|                     | $\text{CO}$   | 10           |

Таблица 5. Приблизительные расчетные данные

| Топливо             | Загрязнитель  | Выбросы, ppm |
|---------------------|---------------|--------------|
| Синтез газ          | $\text{NO}_x$ | $\sim 55$    |
|                     | $\text{CO}$   | 22 - 45      |
| Чистый $\text{H}_2$ | $\text{NO}_x$ | $> 50$       |
|                     | $\text{CO}$   | 0 - 60       |
| Природный газ       | $\text{NO}_x$ | $\sim 35$    |
|                     | $\text{CO}$   | $\sim 15$    |

Проведены предварительные расчеты  $\text{NO}_x$  по формулам (1) и (2). В сравнении с реальными экспериментальными данными значения значительно завышены, вероятнее всего из-за упрощенной аналитической модели.

Водород, особенно «зеленый» - ключевой инструмент декарбонизации транспорта, авиации и судоходства. Несмотря на малую долю в мировом производстве (<1%), его внедрение обеспечит нулевые выбросы  $\text{CO}_2$ . Оптимальным методом транспортировки остаются магистральные трубопроводы, хотя криогенные технологии и химические носители (аммиак, метанол) актуальны для удаленных зон.

Основные вызовы — рост выбросов  $\text{NO}_x$  при сжигании водорода в газотурбинных установках и высокая стоимость «зеленого» водорода (2,28–7,39 \$/кг). Решение требует внедрения систем SCR, оптимизации процессов горения и масштабирования CCS-инфраструктуры для «голубого» водорода.

Перспективы связаны с междисциплинарными исследованиями: снижение энергозатрат электролиза, разработка коррозионно-устойчивых материалов и гибридных систем (водород + углеводороды). Успех декарбонизации зависит от государственной поддержки, пилотных проектов и координации науки, промышленности и регуляторов.

### Список литературы

1. Якубсон К.И. Prospects for Using Hydrogen in Various Branches of the World Economy as One of the Directions of Its Decarbonization // Russian Journal of Applied Chemistry. 2022. Т. 95. № 3. С. 309–340. DOI: 10.1134/S1070427222030016.
2. Иванова Е.Э. и др. Анализ оптимальных способов транспортировки водорода // Наука и технологии: перспективы развития и применения. – 2023. – С. 28-45.
3. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980. — 478 с.
4. Uçok, M. D. (2023). Prospects for hydrogen fuel cell vehicles to decarbonize road transport, 4(42). <https://doi.org/10.1007/s43621-023-00159-1>
5. Arcos, J.M.M.; Santos, D.M.F. The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production. *Gases* 2023, 3, 25–46. <https://doi.org/10.3390/gases3010002>
6. Enerdata. (2023). *Global Energy Statistical Yearbook 2023*. <https://yearbook.enerdata.net> [Электронный ресурс]
7. Wu, Jianfan, et al. "Advanced Gas Turbine Combustion System Development for High Hydrogen Fuels." *ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air*, ASME, 2007, Article GT2007-28337