

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 удалено «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 энергоемкости, 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).

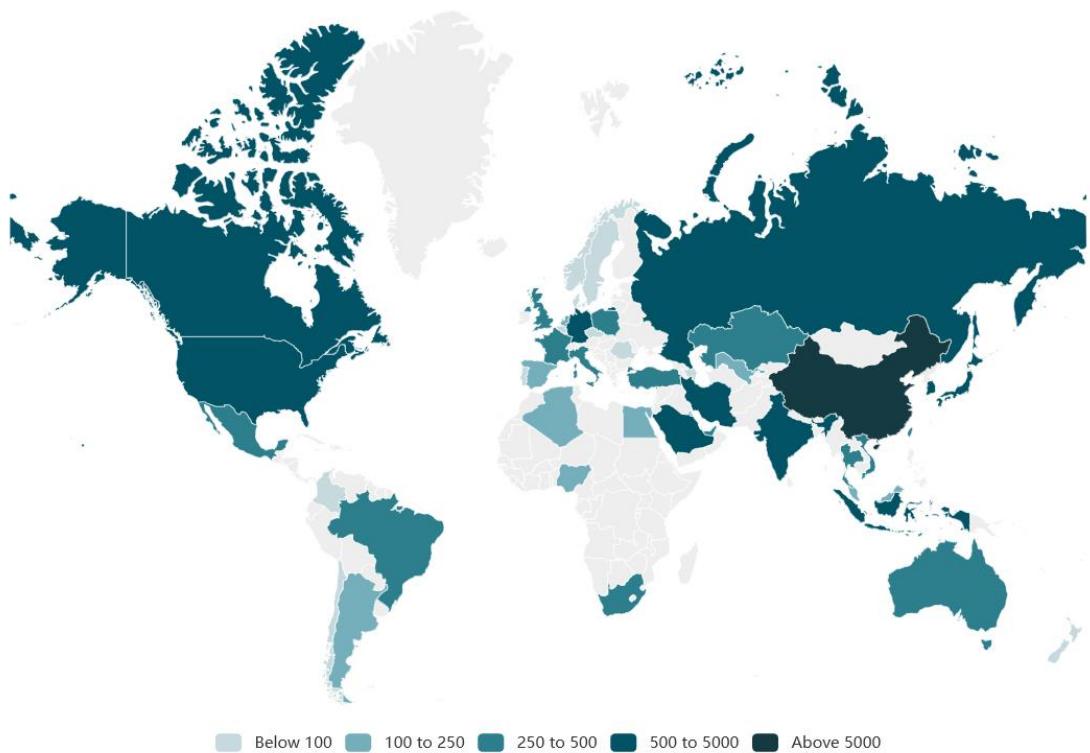


Рис.1. Мировые выбросы миллионов тонн  $\text{CO}_2$  по странам за 2023 год.

*Голубой водород* - получается налогично серому, но с улавливанием и хранением углерода (CCS), что снижает выбросы  $\text{CO}_2$  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 генерации 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(кг $\text{CO}_2$ /кг $\text{H}_2$ )
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°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 термокаталитической 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 требуется 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°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 С/Н-соотношением и каталитический риформинг.

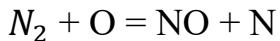
Аммиак ( $\text{NH}_3$ ), несмотря на выбросы  $\text{NO}_x$  и коррозионные риски, обладает уникальным преимуществом - глобальной инфраструктурой производства (180+ млн тонн/год) и транспортировки.

Для газотурбинных систем водородные носители обеспечивают:

1. Политопливность ;
2. синергию с системами SCR (снижение  $\text{NO}_x$  на 80–95%);
3. высокую удельную мощность ( $>400 \text{ МВт/м}^3$ ).

Такие установки демонстрируют углеродную интенсивность  $<0.1 \text{ кг CO}_2/\text{кВт}\cdot\text{ч}$ , 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  $\text{NO}_x$  на фоне снижения выброса  $\text{CO}_2$ . Термический  $\text{NO}_x$  образуется при высоких температурах ( $>1300^\circ\text{C}$ ) из атмосферного азота ( $\text{N}_2$ ) и кислорода ( $\text{O}_2$ ) по механизму Зельдовича:



Для предварительной оценки выброса  $\text{NO}_x$  при максимально возможной температуре ( $\sim 1500^\circ\text{C}$ ) 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
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
	CO	10
Чистый $\text{H}_2$	$\text{NO}_x$	15
	CO	0
Природный газ	$\text{NO}_x$	25
	CO	10

Таблица 5. Приблизительные расчетные данные

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

Проведены предварительные расчеты NO<sub>x</sub> 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 CO<sub>2</sub>. Оптимальным методом транспортировки остаются магистральные трубопроводы, хотя криогенные технологии и химические носители (аммиак, метанол) актуальны для удаленных зон.

Основные вызовы — рост выбросов NO<sub>x</sub> 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 элекролиза, 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., Баренблatt 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