

Жайворонок Д.А.

кандидат техн. наук, доцент, кафедры
производства, ремонта и эксплуатации машин
Воронежского государственного
лесотехнического университета имени
Г.Ф. Морозова, РФ

Шакина Ф.А.

преподаватель кафедры производства,
ремонта и эксплуатации машин
Воронежского государственного
лесотехнического университета имени
Г.Ф. Морозова, РФ

Крухмалев С.Н.

преподаватель кафедры производства,
ремонта и эксплуатации машин
Воронежского государственного
лесотехнического университета имени
Г.Ф. Морозова, РФ

Zhaivoronok D.A.

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor at the Department of Production,
Repair and Operation of Machinery, Voronezh
State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Russian Federation

Shakina F.A.

lecturer at the Department of Production, Repair
and Operation of Machinery, Voronezh State
University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov, Russian Federation

Krukhmalev S.N.

lecturer at the Department of Production, Repair
and Operation of Machinery, Voronezh State
University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov, Russian Federation

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРО-ТОПЛИВА В КОНТЕКСТЕ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ТРАНСПОРТА

PROSPECTS FOR THE USE OF SYNTHETIC ELECTRIC FUELS IN THE CONTEXT OF DECARBONIZATION OF TRANSPORT

Аннотация. В статье рассматривается роль синтетического электротоплива (e-Fuels) в глобальном процессе декарбонизации транспортного сектора. Проанализированы технологические основы производства, потенциальные преимущества и основные проблемы, сдерживающие массовое внедрение. Проведено сравнение e-Fuels с аккумуляторными электромобилями и водородными топливными элементами по ключевым критериям, таким как углеродный след, энергоэффективность и применимость в различных видах транспорта. Сделан вывод о нишевой, но критически важной роли синтетического топлива для трудно-электрифицируемых сегментов.

Abstract. The article examines the role of synthetic electric fuels (e-Fuels) in the global decarbonization of the transport sector. The technological foundations of production, potential advantages and main problems hindering mass adoption are analyzed. E-Fuels are compared with battery electric vehicles and hydrogen fuel cells according to key criteria such as carbon footprint, energy efficiency and applicability in various modes of transport. The conclusion is made about the niche but critically important role of synthetic fuels for difficult-to-electrify segments.

Ключевые слова: синтетическое электротопливо, E-Fuels, декарбонизация транспорта, углеродная нейтральность, возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

Keywords: synthetic electric fuels, E-Fuels, transportation decarbonization, carbon neutrality, renewable energy sources (RES).

Глобальная задача по достижению углеродной нейтральности к середине XXI века требует радикальной трансформации транспортной отрасли, являющейся одним из основных источников парниковых газов. Доминирующим трендом последнего десятилетия стала стремительная электрификация легкового автотранспорта на основе аккумуляторных батарей (BEV – Battery Electric Vehicles). Однако, существуют сегменты, где прямая электрификация сопряжена с существенными технологическими и экономическими трудностями [1]. Речь идет о авиационном, морском и грузовом автомобильном транспорте, где требования к энергоемкости топлива и времени заправки крайне высоки.

В этом контексте синтетическое электротопливо (e-Fuels) рассматривается как потенциальное решение, способное совместить преимущества жидких углеводородов с принципами углеродной нейтральности. В данной статье проводится оценка реальной перспективы и места e-Fuels в будущей низкоуглеродной транспортной системе [2].

Синтетическое электротопливо – это жидкое или газообразное топливо, получаемое с использованием возобновляемой электроэнергии. Его производство основано на процессе, обратном сгоранию, и состоит из нескольких основных этапов:

1 Производство «зеленого» водорода. Методом электролиза воды с использованием электроэнергии из возобновляемых источников (ВИЭ) – солнца, ветра – производится водород (H_2). Этот этап является энергоемким, но критически важным для обеспечения нулевого углеродного следа на старте цепочки.

2 Улавливание диоксида углерода (CO_2). Углеродная компонента для топлива извлекается непосредственно из атмосферного воздуха (технологии DAC – Direct Air Capture) или из промышленных выбросов.

3 Синтез. На заключительном этапе водород и диоксид углерода вступают в химическую реакцию синтеза (например, процесс Фишера-Тропша), в результате которой образуются жидкие углеводороды – синтетическая нефть, которая далее перерабатывается в бензин, дизельное топливо, керосин или метанол.

Принцип углеродной нейтральности заключается в том, что CO_2 , выделяющийся при сгорании e-Fuels в двигателе, ранее был изъят из атмосферы для его производства [3]. Таким образом, в идеальном сценарии создается замкнутый углеродный цикл, не увеличивающий концентрацию CO_2 в атмосфере.

Основные преимущества e-Fuels делают их особенно привлекательными для конкретных транспортных сегментов:

1 Совместимость с существующей инфраструктурой. E-Fuels могут использоваться в стандартных двигателях внутреннего сгорания (ДВС) и распределяться через существующие сети АЗС, трубопроводов и танкеров. Это устраняет необходимость в триллионных инвестициях в полную замену инфраструктуры.

2 Высокая энергоемкость. Как и традиционные углеводороды, синтетическое топливо обладает высокой удельной энергоемкостью (на единицу массы/объема), что является ключевым требованием для авиации и судоходства, где вес и объем топлива, напрямую влияют на коммерческую эффективность [4].

3 Удобство хранения и транспортировки. Жидкое топливо может храниться в резервуарах длительное время и перевозиться с минимальными потерями, что решает проблему сезонного характера некоторых ВИЭ.

4 «Зеленый» апгрейд действующего парка. E-Fuels рассматриваются как инструмент декарбонизации для уже находящихся в эксплуатации сотен миллионов автомобилей с ДВС, продлевая их жизненный цикл в новых экологических реалиях [5].

Перспективные области применения:

1 Авиация (Sustainable Aviation Fuels – SAF): Синтетический авиакеросин – один из немногих реалистичных путей декарбонизации дальнемагистральных перелетов.

2 Морской транспорт: Синтетический метанол и дизельное топливо для судоходства.

3 Грузовой автомобильный транспорт: Для магистральных перевозок, где большая масса и стоимость тяговых батарей делают BEV менее выгодными.

4 Спецтехника (машинах и оборудовании, которые работают в условиях, где электрификация крайне затруднена или невозможна).

Несмотря на потенциал, массовому внедрению e-Fuels препятствует ряд серьезных проблем:

1 Крайне низкая энергоэффективность. По полной цепочке «ВИЭ→e-Fuels→ДВС» КПД составляет всего 10–20%. Это означает, что большая часть дорогостоящей возобновляемой энергии тратится впустую на каждом этапе преобразования. Для сравнения, КПД цепи «ВИЭ→АКБ→электромотор» превышает 70–80% [6].

2 Высокая стоимость производства. На сегодняшний день производство e-Fuels в 3–5 раз дороже, чем производство ископаемого топлива, и значитель-

но дороже, чем электрическая тяга для транспорта. Снижение стоимости зависит от резкого удешевления электролизеров и энергии ВИЭ.

3 Ограниченность ресурсов «зеленой» энергии. Для масштабного производства e-Fuels потребуется колоссальное количество возобновляемой электроэнергии [7]. В условиях, когда эта же энергия нужна для прямой электрификации других секторов экономики, возникает вопрос о рациональном распределении ресурсов.

4 Неполная углеродная нейтральность. На практике выбросы возникают на всех этапах: при производстве оборудования для ВИЭ, улавливании CO₂, транспортировке. Полная нейтральность достижима только в идеализированной модели (таблица).

Таблица – Сравнительная характеристика перспективных экологических двигателей и энергоносителей

Критерий	Аккумуляторные электромобили (BEV)	Водород на топливных элементах (FCEV)	Синтетическое топливо (e-Fuels)
Область применения	Легковой транспорт, городские автобусы, легкие коммерческие автомобили	Грузовики, автобусы, коммерческий транспорт	Авиация, судоходство, грузовой транспорт, спецтехника
Энергоэффективность (полная цепь)	Высокая (70–80%)	Низкая (25–35%)	Крайне низкая (10–20%)
Заправочная инфраструктура	Требуется масштабного строительства зарядных станций	Требуется создания дорогостоящей сети заправки водородом	Использует существующую инфраструктуру
Время заправки / зарядки	Высокое (минуты-часы)	Низкое (3–5 минут)	Низкое (3–5 минут)
Углеродный след	Нулевой на выхлопе, зависит от способа генерации электроэнергии	Нулевой на выхлопе (вода), зависит от способа производства H ₂	Условно-нейтральный на полном цикле
Ключевой барьер	Стоимость и ресурсы для батарей, емкость, скорость зарядки	Стоимость производства H ₂ и инфраструктура	Крайне высокая стоимость и низкий КПД

Синтетическое электротопливо не является универсальным или наиболее эффективным решением для декарбонизации всего транспорта. Его ниша опре-

деляется не конкуренцией с аккумуляторными технологиями в легковом сегменте, а заполнением тех областей, где прямая электрификация на сегодняшний день технологически или экономически нецелесообразна.

Перспективы e-Fuels напрямую зависят от глобального прогресса в двух направлениях: резкого снижения стоимости возобновляемой электроэнергии и совершенствования технологий улавливания CO₂. Государственная поддержка в виде углеродного налога, квот на использование SAF в авиации и инвестиций в НИОКР будет ключевым драйвером для развития этой отрасли [8].

Таким образом, в будущей низкоуглеродной транспортной системе e-Fuels займут стратегически важную, но дополняющую роль, обеспечив экологическую устойчивость тех сегментов мобильности, которые невозможно перевести на прямую электрификацию, сохранив при этом гибкость и надежность, предоставляемые жидким топливом.

Список литературы

1. ИЕА (2021). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. – International Energy Agency. – URL: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> (дата обращения: 17.10.2023).
2. Ueckerdt, F., Bauer, C., Dirnau, A. et al. (2021). Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. *Nature Climate Change*, Vol. 11, P. 384–393. – URL: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7> (дата обращения: 17.10.2023).
3. Gray, N., McDonagh, S., O'Shea, R. et al. (2021). Decarbonising ship propulsion with alternative fuels. *Nature Energy*, Vol. 6, P. 1137–1143. – URL: <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00935-1> (дата обращения: 17.10.2023).
4. Громов, Н.В., Терентьев, А.С. (2022). Синтетические углеводородные топлива как элемент декарбонизации энергетики и транспорта. *Энергетическая политика*, № 5(183), С. 44–57.
5. Белов, П.С., Козлов, Д.А. (2023). Технико-экономический анализ производства и применения электротоплив (e-Fuels). *Альтернативная энергетика и экология*, № 1-3, С. 60–75.
6. Features of radio communication organization in logging areas / D. Zhaivoronok, A. Novikov, I. Terehina, F. Shakina // *BIO Web of Conferences*. – 2024. – Vol. 145. – P. 04020. – DOI 10.1051/bioconf/202414504020. – EDN JHZYQC.
7. Directive (EU) 2023/... of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources (Recast). – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023L2413> (дата обращения: 17.10.2023).
8. Дорохин, С. В. Организации радиосвязи с удаленными подвижными наземными объектами / С. В. Дорохин, В. А. Иванников, Д. А. Жайворонок // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2024. – Т. 12, № 4(47). – DOI 10.26102/2310-6018/2024.47.4.028. – EDN DHXOLK.

References

1. IEA (2021). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. – International Energy Agency. – URL: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> (date of request: 17.10.2023).
2. Ueckerdt, F., Bauer, C., Dirnaichner, A. et al. (2021). Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. *Nature Climate Change*, Vol. 11, pp. 384-393. – URL: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7> (date of request: 17.10.2023).
3. Gray, N., McDonagh, S., O'Shea, R. et al. (2021). Decarbonising ship propulsion with alternative fuels. *Nature Energy*, Vol. 6, pp. 1137-1143. – URL: <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00935-1> (date of request: 10/17/2023).
4. Gromov, N.V., Terentyev, A.S. (2022). Synthetic hydrocarbon fuels as an element of decarbonization of energy and transport. *Energy Policy*, No. 5(183), pp. 44-57.
5. Belov, P.S., Kozlov, D.A. (2023). Technical and economic analysis of the production and application of electric fuels (e-Fuels). *Alternative Energy and Ecology*, No. 1-3, pp. 60-75.
6. Features of radio communication organization in lugging areas / D. Zhaivoronok, A. Novikov, I. Terehina, F. Shakina // *BIO Web of Conferences*. – 2024. – Vol. 145. – P. 04020. – DOI 10.1051/bioconf/202414504020. – EDN JHZYQC.
7. Directive (EU) 2023/... of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources (Recast). – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023L2413> (date of request: 17.10.2023).
8. Dorokhin, S. V. Organization of radio communication with remote mobile ground objects / S. V. Dorokhin, V. A. Ivannikov, D. A. Zhayvoronok // *Modeling, optimization and information technologies*. – 2024. – Vol. 12, No. 4(47). – DOI 10.26102/2310-6018/2024.47.4.028 . – EDN DHXOLK.