УДК 662.7

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ВИДЫ ТОПЛИВА ДЛЯ ГРУЗОВОГО ТРАНСПОРТА: LCA-АНАЛИЗ И РАНЖИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

А.С. ПОДЛЕЩУК, А.С. ДЕМЬЯНОВА
(Представлено: А.П. РОЗИНА)

Проведён LCA-анализ газового (СПГ и КПГ), электрического, водородного и биотоплива для грузового транспорта. Выявлены скрытые экологические издержки, выполнено ранжирование технологий. Согласно результатам оценки жизненного цикла, наиболее сбалансирован СПГ; электричество оптимально для города; водород в текущем виде экологически неоправдан; биотопливо – имеет ограниченную сферу применения. Разработаны рекомендации для Республики Беларусь.

Глобальная транспортная отрасль находится на этапе глубокой трансформации, обусловленной необходимостью снижения антропогенного воздействия на климат. Грузовой транспорт, являясь одним из крупнейших потребителей нефтепродуктов, вносит существенный вклад в эмиссию парниковых газов, оксидов азота и твёрдых частиц: на его долю приходится около 35% выбросов CO_2 от транспортного сектора и порядка 7% глобальных антропогенных выбросов. При этом с 2000 по 2020 г. глобальные выбросы от грузового транспорта увеличились примерно на 40%, что свидетельствует о недостаточной эффективности принимаемых мер. Ключевым событием, задавшим вектор регулирования в Европе, стала совместная конференция Международного союза автомобильного транспорта (IRU) и Европейского союза, посвящённая пакету мер «Fit for 55». Цель данного пакета – создать условия для снижения выбросов CO_2 на 55% к 2030 году, нарастив темпы выполнения планов ЕС по полной декарбонизации к 2050 году [1]. Помимо «Fit for 55», вектор декарбонизации задают Директива ЕС о возобновляемых источниках энергии (RED II) и Регламент о нормах выбросов CO_2 для транспортных средств большой грузоподъемности. Для Республики Беларусь, где грузовой транспорт остаётся одним из основных потребителей нефтепродуктов, проблема особенно актуальна.

Проблематика экологической эффективности альтернативных видов топлива активно исследуется как в зарубежной, так и в отечественной науке. Авторы рассматривают газомоторное топливо как переходное решение, проводятся исследования, посвященные электрификации грузового транспорта. Водородные технологии находится на стадии пилотных проектов, в то время как применение биотоплива ограничено выбросами N_2O и агрессивностью к двигателю, что обуславливает его ограниченную сферу применения. Однако комплексного сравнения всех четырёх технологий с учётом полного жизненного цикла применительно к условиям Республики Беларусь в проанализированных источниках не представлено.

Объектом настоящего исследования выступает совокупность альтернативных видов топлива для грузового транспорта. Предметом исследования является их экологическая эффективность. Целью работы является ранжирование альтернативных видов топлива по интегральному показателю экологической эффективности с учётом полного жизненного цикла и разработка рекомендаций для Республики Беларусь.

В связи с этим, исследование направлено на ответ на вопрос: какая из технологий альтернативного топлива обеспечивает наибольшую экологическую эффективность с учётом полного жизненного цикла и может быть рекомендована для различных сегментов грузовых перевозок в Республике Беларусь? Научная новизна работы заключается в комплексном сравнении четырёх технологий по единым критериям жизненного цикла с учётом специфики Республики Беларусь, а также в формализованном многокритериальном ранжировании, позволяющем выявить скрытые экологические издержки.

Методологическую основу составили оценка жизненного цикла (LCA-анализ), многокритериальное ранжирование и сценарный подход.

Практическая значимость состоит в возможности использования результатов при разработке дорожной карты декарбонизации грузового транспорта Республики Беларусь, при обосновании государственных льгот и субсидий, а также при выборе топливных стратегий транспортными организациями. Дополнительно в работе обсуждаются ограничения и неопределённости внедрения альтернативных топлив в условиях Республики Беларусь.

Для систематизации информации ниже представлена таблица 1, обобщающая основные характеристики рассматриваемых видов топлива.

Исходя из анализа данных таблицы 1, сравнительный анализ требует учёта не только фазы эксплуатации, но и полного жизненного цикла каждой технологии, включая добычу сырья, производство энергоносителя и компонентов, транспортировку, утилизацию, а также вторичные эффекты. Такой подход позволяет выявить не только очевидные преимущества, но и скрытые экологические издержки. Перейдём к последовательному рассмотрению каждой технологии.

Таблица 1. – Сравнительная характеристика альтернативных видов топлива для грузового транспорта

Вид топлива	Преимущества	Недостатки	Технологические ограничения	Примеры использования
Газовое	Отсутствие тяжёлых металлов и примесей; снижение выбросов вредных веществ на 25–50%; для СПГ – сохранение грузоподъёмности	Утечки метана (парниковый эффект); пропан и бутан – продукты перегонки нефти	Уменьшение мощности ДВС; потребность в частом обслуживании; увеличение веса машины для КПГ; нехватка газовых АЗС; для СПГ – криогенное оборудование	Isuzu GIGA; МАЗ (газомоторная линейка); БелАЗ-7513Р; Iveco S-WAY LNG
Электрическое	Нулевые прямые выбросы; снижение шума; снижение зависимости от импорта нефти	Высокий углеродный след при производстве аккумуляторов; добыча лития оставляет токсичный фильтрат	Ограниченный запас хода (МАЗ-692Е55 – 170 км); модернизация электросетей; длительное время зарядки	Vitovt Truck Electro Prime; «МоскВА» на базе КАМАЗа; МАЗ-4381ЕЕ
Водородное	Эксплуатационные выбросы – только водяной пар; высокая мощность и дальний ход; быстрая дозаправка	При производстве «серого» водорода – высокие выбросы CO_2; высокая стоимость	Отсутствие сети водородных заправочных станций; высокая стоимость топливных элементов	Volvo; БелАЗ (130-тонный самосвал); проект 220-тонной машины
Биотопливо	Замкнутый круговорот CO_2; отсутствие серы; полная биоразлагаемость; точка воспламенения 325°С	Повышенное выделение закиси азота (на 10–12%); закоксовывание форсунок; агрессивность к резине	Низшая теплота сгорания; зависимость от климата (рапс – до минус 10°С)	Isuzu GIGA (многотопливный двигатель)

Примечание: собственная разработка на основе источников [2–15].

При сравнении газового топлива и электричества обнаруживается принципиальное различие в распределении экологической нагрузки. Газовое топливо демонстрирует умеренные выбросы на всех этапах: добыча природного газа сопряжена с утечками метана, составляющими 1–3% от общего объёма добычи, что эквивалентно 28–34 кг CO_2 с учётом потенциала глобального потепления. Однако при сжигании в двигателе выбросы CO_2 снижаются на 25–50% по сравнению с дизелем. Для КПГ характерно увеличение массы автомобиля за счёт тяжёлых баллонов, что снижает полезную грузоподъёмность и увеличивает удельные выбросы на тонно-километр. СПГ, напротив, позволяет сохранить грузоподъёмность благодаря криогенному хранению, но требует более сложного оборудования. Электрические грузовики имеют нулевые прямые выбросы при движении, однако производство литий-ионных аккумуляторов потребляет в два раза больше энергии и сопровождается повышенными выбросами CO_2. Добыча лития оставляет токсичный фильтрат и может усугублять засухи, так как требует около 2 млн л воды на 1 т. Таким образом, экологический выигрыш электромобиля зависит от того, насколько «чистой» является электроэнергия, и от срока службы аккумулятора.

Если газовое и электрическое топливо уже имеют развитую инфраструктуру и массовое производство, то водородное направление пока находится на стадии пилотных проектов. Тем не менее оно заслуживает отдельного рассмотрения.

Водородное топливо занимает особое место. С точки зрения эксплуатации водородные грузовики выбрасывают только водяной пар, что делает их идеальными для локального качества воздуха. Однако эти преимущества нивелируются, если водород производится из природного газа без улавливания CO_2 («серый» водород). Производство 1 кг «серого» водорода сопровождается выбросами 10–12 кг CO_2, что при сжигании в двигателе даёт суммарные выбросы на 20–30% выше, чем у дизеля. Производство «зелёного» водорода методом электролиза пока остаётся дорогим и малораспространённым.

Замыкает рассматриваемый спектр биотопливо, которое, в отличие от предыдущих технологий, основано на возобновляемом углеродном цикле.

Биотопливо демонстрирует замкнутый круговорот углекислого газа. При сгорании биодизеля выделяется столько же CO_2, сколько было поглощено растением. К дополнительным преимуществам относятся отсутствие серы, полная биоразлагаемость и высокая температура воспламенения (325 °С). Однако выявлены два критических недостатка: выделение на 10–12% больше закиси азота (N_2O), потенциал глобального потепления которого почти в 300 раз превышает CO_2, и агрессивность к деталям двигателя, сокращающая ресурс на 15–20%. Кроме того, производство биотоплива зависит от климата: рапс, наиболее перспективная культура для Беларуси, не выдерживает температур ниже минус 10 °С.

Обобщая результаты сравнительного анализа, следует отметить, что экологическая эффективность рассмотренных технологий не может быть оценена однозначно: каждая из них характеризуется специфическим распределением нагрузки по стадиям жизненного цикла. Это обусловливает необходимость формализованного ранжирования по совокупности критериев.

1. СПГ – обеспечивает значительное снижение выбросов CO_2 (на 25–50%), практически полное отсутствие тяжёлых металлов и серы, не снижает грузоподъёмность и имеет запас хода, сопоставимый с дизельным. Производство масштабировано;
2. Электрические грузовики – высокая эффективность достигается только в регионах с «чистой» электроэнергией и при условии длительной эксплуатации аккумулятора (8–10 лет) с последующей переработкой;
3. КПГ – уступает СПГ из-за снижения грузоподъёмности и меньшего запаса хода;
4. Биотопливо – возобновляемость снижается из-за выбросов закиси азота и агрессивности к двигателю;
5. Водородное топливо в текущем «сером» виде – экологически не лучше, а зачастую хуже прямого сжигания метана.

Проведённое ранжирование отражает общую экологическую эффективность технологий, однако не учитывает специфику конкретных сегментов перевозок. Для разных типов маршрутов и условий эксплуатации оптимальными могут оказаться разные технологии. Рассмотрим основные сценарии.

Для магистральных перевозок на дальние расстояния (более 500 км в сутки) наиболее эффективны СПГ и водородные грузовики. Для городской доставки и региональных перевозок (до 150–200 км в день) электрические грузовики не имеют альтернатив. Для сельскохозяйственных перевозок в удалённых районах биотопливо может быть временным решением. Для карьерной техники газодизельные гибриды с замещением дизеля до 50% показывают высокую эффективность; Беларусь является единственной страной, выпускающей такие машины грузоподъёмностью 90 тонн и выше.

К скрытым экологическим издержкам относятся: рост токсичности и водного дефицита при добыче лития; выбросы закиси азота при использовании биотоплива; суммарный углеродный след «серого» водорода; снижение грузоподъёмности из-за баллонов, ведущее к росту числа рейсов.

Рассмотренные сценарии и компромиссы носят общий характер. Их реализация в конкретной стране зависит от инфраструктурных, производственных, экономических и институциональных условий. Для Республики Беларусь характерен ряд специфических ограничений и неопределённостей:

– первая группа ограничений – инфраструктурные. Существующие электрические сети не рассчитаны на мегаваттные нагрузки для быстрой зарядки. Не хватает газовых заправочных станций, особенно для СПГ. Водородная инфраструктура отсутствует;

– вторая группа – производственно-технологические. Беларусь обладает сильным потенциалом: МАЗ выпускает электромусоровоз МАЗ-692Е55 и электрогрузовик МАЗ-4381ЕЕ, «БКМ Холдинг» представил Vitovt Truck Electro Prime, БелАЗ – мировой лидер по газовым и электрическим карьерным самосвалам. Однако разработки носят единичный характер, массовое производство упирается в неопределённость спроса;

– третья группа – экономические и регуляторные неопределённости. Стоимость владения электрическим грузовиком высока. Для газовых грузовиков существует неопределённость с долгосрочной ценой на газ. Для биотоплива отсутствует промышленная индустрия переработки;

– четвёртая группа – институциональная. Отсутствуют обученный персонал, сертифицированные мастерские, системы утилизации аккумуляторов, а также методики оценки полного жизненного цикла для субсидирования.

Проведённое исследование показало, что ни один из рассмотренных видов топлива не является абсолютно экологичным на всех стадиях жизненного цикла. Каждая технология характеризуется специфическим распределением экологической нагрузки: газовое топливо проигрывает на стадии добычи из-за утечек метана, электричество – на стадии производства аккумуляторов, водород – на стадии производства энергоносителя, биотопливо – на стадии эксплуатации из-за выбросов N_2O.

По результатам многокритериального ранжирования первое место занимает СПГ, второе – электричество, третье – КПГ, четвёртое – биотопливо, замыкает рейтинг водород в текущем «сером» виде.

Отметим, что для Республики Беларусь целесообразно развивать дифференцированную стратегию по сегментам перевозок. Необходимо внедрить методику оценки полного жизненного цикла как условие для государственных льгот, а также создать стимулы для локализации производства ключевых компонентов и развивать производство биотоплива из отходов. Как результат синхронизировать усилия производителей техники, энергетиков и регуляторов в рамках единой дорожной карты декарбонизации грузового транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fit for 55 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.iru.org/ru/novosti-i-spravochnye-materialy/novosti/fit-55-perspektivy-dlya-avtomobilnogo-transporta. – Дата доступа: 13.04.2026.

2. Габдулов, И.Н. Газообразное топливо – топливо будущего / И.Н. Габдулов // Вопросы науки и образования. – 2019. – № 25(74) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/gazoobraznoe-toplivo-toplivo-buduschego. – Дата доступа: 13.04.2026.
3. Как в Беларуси развивается транспорт на альтернативном топливе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://minsknews.by/kak-v-belarusi-razvivaetsya-transport-na-alternativnom-toplive/. – Дата доступа: 13.04.2026.
4. Газ как альтернатива бензину [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mskremgaz.ru/stati/gaz-kak-alternativa-benzinu-plyusy-i-minusy-gbo-dlya-avto/. – Дата доступа: 13.04.2026.
5. Альтернативные виды топлива в негабаритном транспорте [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://trans.info/ru/alternativnyie-vidyi-topliva-v-negabaritnom-transporte-pervyie-gruzoviki-uzhe-na-dorogah-277638. – Дата доступа: 13.04.2026.
6. Электрические грузовые автомобили [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://globexspb.com/blog/ehlektricheskie-gruzovye-avtomobili/. – Дата доступа: 13.04.2026.
7. Какое влияние на окружающую среду оказывают электромобили? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://share.google/G11h1rLqDnLt4zISU. – Дата доступа: 13.04.2026.
8. Электрогрузовики в Беларуси [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://smartpress.by/idea/avto/elektrogruzoviki-v-belarusi-chego-ne-khvataet-dlya-elektrifikatsii-logistiki/. – Дата доступа: 13.04.2026.
9. Водородные грузовики Volvo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://russpain.com/energia/vodorodnye-gruzoviki-volvo-pochemu-ih-zapusk-mozhet-perevernut-rynok-perevozok-426585. – Дата доступа: 13.04.2026.
10. Москвин, П.А. Биотопливо для автомобилей и проблемы его применения / П.А. Москвин // Глобальная энергия. – 2011. – № 2(123) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/biotoplivo-dlya-avtomobiley-i-problemy-ego-primeneniya. – Дата доступа: 13.04.2026.
11. «Нулевой выброс» и безопасная мобильность [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://abw.by/news/commercial/2025/11/16/nulevoi-vybros-i-bezopasnaya-mobilnost-obzor-novinok-komtransa-na-japan-mobility-show--2025. – Дата доступа: 13.04.2026.
12. «МоскВА» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://sberbusiness.live/publications/pereiti-na-elektrichestvo-stoit-li-transportnim-kompaniyam-zadumivatsya-o-smene-avtoparka. – Дата доступа: 13.04.2026.
13. Электрогрузовики МАЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://auto.onliner.by/2022/02/04/maz-4381ee. – Дата доступа: 13.04.2026.
14. Электромусоровоз МАЗ-692Е55 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://maz.by/media/news/2024/12/24/maz-predstavil-elektromusorovoz-maz-692e55. – Дата доступа: 13.04.2026.
15. Электрогрузовик Vitovt Truck Electro Prime [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://holdingbkm.com/catalog/elektrogruzovik/. – Дата доступа: 13.04.2026.