



ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ

УДК 614.841.34:662.767

Е.Д. СТАРОВОЙТОВ

преподаватель кафедры пожарной аварийно-спасательной техники¹

E-mail: jenya_starow@mail.ru

С.Н. ПОДДУБКО, канд. техн. наук, доц.

генеральный директор²

E-mail: info@oim.by

А.В. ПИВОВАРОВ

преподаватель кафедры ликвидации чрезвычайных ситуаций¹

E-mail: sasha1500vo@list.ru

¹ Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь

² Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 29.09.2025.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЖАРНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ С ТРАДИЦИОННЫМИ, ГИБРИДНЫМИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СИЛОВЫМИ УСТАНОВКАМИ

В статье представлен сравнительный анализ пожарных автомобилей с различными типами силовых установок — дизельными, гибридными и полностью электрическими. Рассмотрены модели общего применения: АЦ 5,0-40 на шасси МАЗ-5309, Rosenbauer RT/RTX, Pierce Volterra, E-ONE Vector и Emergency One EV0, которые в соответствии с СТБ 11.13.04-2009 относятся к классу тяжелых пожарных автоцистерн с полной массой более 14 т. Все образцы имеют сопоставимую массу в пределах 18–24 т, что обеспечивает корректность сравнения эксплуатационных показателей. Для полноты картины дополнительно исследована специализированная аэродромная машина Ziegler Z6 HYBRIDdrive, также относящаяся к тяжелому классу, но обладающая значительно большей массой (40 т) и предназначенная для применения в специфических условиях. Методика исследования включала расчет энергозатрат и выбросов CO₂ на основе среднегодового пробега, времени работы насосов и холостого хода с учетом удельных норм расхода топлива и электроэнергии. Установлено, что гибридные пожарные автомобили обеспечивают снижение эксплуатационных затрат до 50 % и выбросов CO₂ до 70 % по сравнению с дизельными аналогами, в то время как полностью электрические модели демонстрируют сокращение выбросов более чем на 98 %. Научная новизна работы заключается в применении комплексной методики оценки эффективности пожарной техники с различными типами силовых установок, адаптированной к условиям Республики Беларусь и учитывающей особенности ее энергетической системы. Практическая значимость исследования состоит в том, что гибридные автомобили рассматриваются как оптимальный промежуточный этап модернизации парка, сочетающий экологическую эффективность и эксплуатационную надежность.

Ключевые слова: пожарный автомобиль, гибридная силовая установка, электрический привод, экологическая эффективность, экономия топлива, Rosenbauer RT, Pierce Volterra, Ziegler Z6 HYBRIDdrive, E-ONE Vector, Emergency One EV0

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-5-11>

Актуальность проблемы. Пожарные автомобили традиционно оснащаются дизельными двигателями внутреннего сгорания и составляют основу автопарков пожарно-спасательных подразделений большинства стран мира. Несмотря на высокую надежность и широкую распространенность, такие машины характеризуются значительными эксплуатационными расходами и высоким уровнем выбросов CO_2 . В условиях глобального перехода к низкоуглеродным технологиям и ужесточения экологических стандартов все большее внимание уделяется внедрению гибридных и электрических решений [1–5]. Исследования, проведенные в странах с умеренно-холодным климатом, также подтверждают перспективность данного направления [6–10].

С начала 2020-х годов ведущие мировые производители пожарной техники вывели на рынок новые образцы: Rosenbauer RT/RTX, Pierce Volterra, Ziegler Z6 HYBRIDdrive, E-ONE Vector, Emergency One EV0. Эти модели внедряются в эксплуатацию в Берлине, Лос-Анджелесе, Лондоне, Ванкувере и других городах мира [11–23], что подтверждается практическими результатами.

Особое значение рассматриваемая проблема приобретает в условиях Беларуси. Во-первых, в стране введена в эксплуатацию Белорусская атомная электростанция, что обеспечивает наличие низкоуглеродного источника электроэнергии [24], создающего благоприятные условия для эксплуатации электрических и гибридных пожарных машин. Во-вторых, национальная нормативная база (СТБ 11.13.04-2009) требует адаптации к международным стандартам (EN 1846; NFPA 414; NFPA 1901) для обеспечения возможности интеграции новых технологий в парк пожарно-спасательной техники. В-третьих, климатические особенности Беларуси,

включая низкие зимние температуры, накладывают дополнительные ограничения на использование аккумуляторных систем и требуют применения систем термостатирования [25].

Цель исследования заключается в проведении сравнительного анализа эксплуатационных и экологических характеристик пожарных автомобилей с различными типами силовых установок — дизельных, гибридных и полностью электрических. Задачи исследования включают:

- сравнение технических характеристик и эксплуатационных особенностей;
- расчет энергозатрат и выбросов CO_2 при типовых режимах работы;
- оценку экономической эффективности применения новых технологий;
- анализ перспектив адаптации гибридных и электрических решений к условиям Беларуси.

Современные образцы пожарных автомобилей, используемых в сравнительном анализе, представлены на рисунке.

Технические характеристики исследуемых пожарных автомобилей с различными типами силовых установок приведены в таблице 1.

Методика расчета. Статистические данные по среднегодовому пробегу, времени работы насосов и холостого хода получены на основании анализа эксплуатационной документации пожарных автомобилей, эксплуатируемых в подразделениях МЧС Республики Беларусь.

Для оценки эффективности были использованы усредненные данные об эксплуатации пожарных автомобилей в Беларуси.

1. Эксплуатационные условия:

- $L = 7000$ км/год — средний пробег пожарного автомобиля;



Рисунок — Современные пожарные автомобили: а — АЦ 5,0-40 на шасси МАЗ-5309 (дизель, Беларусь); б — Rosenbauer RT/RTX (последовательный гибрид, Австрия и Германия) [11–13]; в — Pierce Volterra (параллельный гибрид, США) [16–18]; д — Ziegler Z6 HYBRIDdrive (гибрид аэродромного назначения, Германия) [22, 23]; е — E-ONE Vector (полностью электрический, США) [19];

ф — Emergency One EV0 (полностью электрический, Великобритания) [20, 21]

Figure — Modern fire trucks: а — ATs 5.0-40 on the MAZ-5309 chassis (diesel, Belarus); б — Rosenbauer RT/RTX (series hybrid, Austria and Germany) [11–13]; в — Pierce Volterra (parallel hybrid, USA) [16–18]; д — Ziegler Z6 HYBRIDdrive (airport hybrid, Germany) [22, 23]; е — E-ONE Vector (fully electric, USA) [19]; ф — Emergency One EV0 (fully electric, UK) [20, 21]

Таблица 1 — Технические характеристики пожарных автомобилей с различными типами силовых установок
Table 1 — Specifications of fire trucks with various types of power units

Модель	Тип привода	Мощность установки	Батарея, кВт·ч	Запас хода, км (норм. усл.)	Зарядка ДС, ч	Полная масса, т	Производительность насоса, л/мин	Примеры внедрения
АЦ 5,0-40 (МАЗ-5309)	Дизельный ДВС	243 кВт (330 л. с.)	—	—	—	18,6	2400	Беларусь
Rosenbauer RT/RTX	Последовательный гибридный (эл. тяга + ДВС-генератор)	Эл. моторы 2×180 кВт (360 кВт) + дизель BMW 300 л. с.	132	74,8	1–1,5	19	7500	Берлин, Лос-Анджелес, Дубай
Pierce Volterra	Параллельный гибридный (эл. тяга + ДВС через EMIVT)	Эл. мотор 250 кВт + дизель 450 л. с.	155–240	87,8–136	1–1,5	18–20	7500	Мэдисон, Портленд, Ванкувер
Ziegler Z6 HYBRIDdrive	Параллельный гибридный (эл. тяга + дизель Scania V8)	Эл. мотор 230 кВт + дизель 770 л. с. (суммарно 1150 л. с.)	104	58,9	1–2	40	10 000	Аэропорты Европы
E-ONE Vector (BEV)	Полностью электрический	Эл. моторы 400 кВт	327	185,3	2,5–3	24	7500	Меса (США)
Emergency One EV0 (BEV)	Полностью электрический	Эл. моторы 400 кВт	300	170	3	20	7500	Великобритания

- $t_{\text{нас}} = 80$ ч/год — среднее время работы насоса;
- $t_{\text{хх}} = 170$ ч/год — среднее время работы на холостом ходу.

2. Нормы расхода топлива:

- $g_{\text{дв}} = 46,8$ л/100 км — средний расход дизельного топлива в движении;
- $g_{\text{нас}} = 18$ л/ч — средний расход дизельного топлива во время работы насоса;
- $g_{\text{хх}} = 3,2$ л/ч — средний расход дизельного топлива на холостом ходу.

3. Электропотребление:

- $e_{\text{км}} = 1,5$ кВт·ч/км — среднее электропотребление во время движения;
- $P_{\text{нас}} = 100$ кВт (среднее электропотребление во время работы насоса от электропривода).

4. Экономические параметры:

- $P_{\text{дт}} = 2,60$ бел. руб./л — стоимость дизельного топлива по данным концерна «Белнефтехим» на 2025 год;
- $P_{\text{эл}}^{\text{дн}} = 0,2699$ бел. руб./(кВт·ч) — дневной тариф электроэнергии по данным Минэнерго на 2025 год;
- $P_{\text{эл}}^{\text{ноч}} = 0,20521$ бел. руб./(кВт·ч) — ночной тариф электроэнергии по данным Минэнерго на 2025 год.

5. Экологические коэффициенты:

- $EF_{\text{дт}} = 2,69$ кг/л — коэффициент выбросов при сжигании дизельного топлива [26, 27];
- $CI_{\text{эл}} = 0,012$ кг/(кВт·ч) — усредненный международный показатель для атомной генерации [28–30].

6. Доли использования электротяги для гибридных силовых установок:

- $S_{\text{эл.км}} = 0,70$; $S_{\text{эл.нас}} = 0,50$ — Rosenbauer RTX, Pierce Volterra;
 - $S_{\text{эл.км}} = 0,50$; $S_{\text{эл.нас}} = 0,30$ — Ziegler Z6 HYBRIDdrive.
- Годовые затраты на топливо и электроэнергию $C_{\text{эн}}$ (бел. руб./год) определялись по формуле:

$$C_{\text{эн}} = P_{\text{дт}} \cdot V_{\text{дт}} + P_{\text{эл}} \cdot E_{\text{эл}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{дт}}$ — стоимость дизельного топлива, бел. руб./л; $V_{\text{дт}}$ — годовой расход дизельного топлива, л; $P_{\text{эл}}$ — стоимость дневного/ночного тарифа электроэнергии; $E_{\text{эл}}$ — годовое электропотребление, кВт·ч.

Масса выбросов углекислого газа M_{CO_2} (т/год) вычислялась следующим образом:

$$M_{\text{CO}_2} = \frac{EF_{\text{дт}} \cdot V_{\text{дт}} + CI_{\text{эл}} \cdot E_{\text{эл}}}{1000}, \quad (2)$$

где $EF_{\text{дт}}$ — коэффициент выбросов при сжигании дизельного топлива, кг/л; $V_{\text{дт}}$ — годовой расход дизельного топлива, л; $CI_{\text{эл}}$ — усредненный международный показатель для атомной генерации, кг/(кВт·ч).

Годовой расход дизельного топлива при движении $V_{\text{дт}}^{\text{дт}}$ (л) определялся по формуле:

$$V_{\text{дт}}^{\text{дт}} = L \cdot \frac{g_{\text{дв}}}{100}, \quad (3)$$

где L — годовой пробег автомобиля, км; $g_{\text{дв}}$ — удельный расход дизельного топлива при движении, л/100 км.

Годовой расход дизельного топлива при работе насоса $V_{\text{нас}}^{\text{дт}}$ (л) рассчитывался как:

$$V_{\text{нас}}^{\text{дт}} = t_{\text{нас}} \cdot g_{\text{нас}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{нас}}$ — продолжительность работы насоса в год, ч; $g_{\text{нас}}$ — удельный расход дизельного топлива при работе насоса, л/ч.

Годовой расход дизельного топлива на холостом ходу $V_{\text{хх}}^{\text{дт}}$ (л) вычислялся по формуле:

$$V_{\text{хх}}^{\text{дт}} = t_{\text{хх}} \cdot g_{\text{хх}}, \quad (5)$$

где $t_{\text{хх}}$ — продолжительность работы двигателя на холостом ходу, ч; $g_{\text{хх}}$ — удельный расход дизельного топлива на холостом ходу, л/ч.

Годовое потребление электроэнергии на движение $E_{\text{дв}}$ (кВт·ч) определялось следующим образом:

$$E_{\text{дв}} = L \cdot e_{\text{км}}, \quad (6)$$

где $e_{\text{км}}$ — удельное энергопотребление при движении, кВт·ч/км.

Годовое потребление электроэнергии при работе насоса $E_{\text{нас}}$ (кВт·ч) рассчитывалось как:

$$E_{\text{нас}} = t_{\text{нас}} \cdot P_{\text{нас}}, \quad (7)$$

где $P_{\text{нас}}$ — мощность электропривода насоса, кВт.

Годовой расход дизельного топлива $V_{\text{дт}}$ (л) для пожарных автомобилей с гибридной силовой установкой определялся по формуле:

$$V_{\text{дт}} = V_{\text{дв}}^{\text{дт}} \cdot (1 - S_{\text{эл.км}}) + V_{\text{нас}}^{\text{дт}} \cdot (1 - S_{\text{эл.нас}}), \quad (8)$$

где $S_{\text{эл.км}}$ — доля пробега, выполненного на электротяге; $S_{\text{эл.нас}}$ — доля времени работы насоса, обеспечиваемого электротягой.

Общее годовое потребление электроэнергии $E_{\text{эл}}$ (кВт·ч) определялось по формуле:

$$E_{\text{эл}} = E_{\text{дв}} \cdot S_{\text{эл.км}} + E_{\text{нас}} \cdot S_{\text{эл.нас}}. \quad (9)$$

Совокупные энергозатраты при дневном тарифе $C_{\text{дн}}$ (бел. руб.) вычислялись следующим образом:

$$C_{\text{дн}} = P_{\text{дт}} \cdot V_{\text{дт}} + P_{\text{эл}}^{\text{дн}} \cdot E_{\text{эл}}, \quad (10)$$

где $P_{\text{дт}}$ — стоимость дизельного топлива, бел. руб./л; $P_{\text{эл}}^{\text{дн}}$ — дневной тариф на электроэнергию, бел. руб./(кВт·ч).

Совокупные энергозатраты при ночном тарифе $C_{\text{ноч}}$ (бел. руб.) определялись по формуле:

$$C_{\text{ноч}} = P_{\text{дт}} \cdot V_{\text{дт}} + P_{\text{эл}}^{\text{ноч}} \cdot E_{\text{эл}}, \quad (11)$$

где $P_{\text{эл}}^{\text{ноч}}$ — ночной тариф на электроэнергию, бел. руб./(кВт·ч).

Методика расчета основана на положениях IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [1] и учитывает специфику белорусской энергетической системы с низким уровнем углеродных выбросов (наличие АЭС) [28–30]. Это повышает достоверность расчетов при адаптации зарубежного опыта. Формулы разработаны на основе международных подходов [1, 26] и данных эксплуатационных наблюдений.

Результаты расчетов энергозатрат и выбросов CO_2 представлены в таблице 2.

Сравнительный анализ. Согласно данным таблицы 2 базовый дизельный пожарный автомобиль АЦ 5,0-40 на шасси МАЗ-5309 характеризуется наибольшими годовыми эксплуатационными затратами (13 676 бел. руб.) и уровнем выбросов CO_2 (14,16 т/год). Данный образец принят в качестве контрольного для оценки эффективности альтернативных решений.

Гибридные модели Rosenbauer RT/RTX и Pierce Volterra обеспечивают снижение годовых расходов до 7500 бел. руб. и уменьшение выбросов CO_2 до 4,72 т/год, что соответствует 40–50 % экономии топлива и около 70 % снижения углеродного следа по сравнению с дизельным аналогом. При этом наличие резервного дизельного двигателя позволяет поддерживать эксплуатационную готовность даже при отсутствии зарядной инфраструктуры.

Аэродромный пожарный автомобиль Ziegler Z6 HYBRIDdrive демонстрирует меньший эффект: сокращение затрат составляет до 60 %, а снижение выбросов — до 50 % от уровня дизельной машины. Это объясняется большей массой и ограниченной долей работы в электрическом режиме. Однако в специфических условиях (аэропорты, объекты повышенной пожарной опасности) такая машина обеспечивает необходимую мощность (10 000 л/мин) при одновременном снижении выбросов.

Полностью электрические автомобили E-ONE Vector и Emergency One EV0 показывают наилучшие результаты: годовые затраты снижаются до 3800–5000 бел. руб., а выбросы CO_2 — до 0,22 т/год, что эквивалентно более чем 98 % сокращения по сравнению с дизельным аналогом. Ограничивающими факторами остаются высокая стоимость, ограниченный запас хода и зависимость

Таблица 2 — Энергозатраты и выбросы CO_2 для различных типов пожарных автомобилей
Table 2 — Energy consumption and CO_2 emissions for different types of fire trucks

Модель	Тип	Дизельное топливо, л/год	Электроэнергия, кВт·ч/год	Дневной тариф, бел. руб./год	Ночной тариф, бел. руб./год	CO_2 , т/год
АЦ 5,0-40 (МАЗ-5309)	Дизель	5260	0	13 676	13 676	14,16
Rosenbauer RT/RTX	Гибрид	1703	11 350	7491	6756	4,72
Pierce Volterra	Гибрид	1703	11 350	7491	6756	4,72
Ziegler Z6 HYBRIDdrive	Гибрид	2646	7650	8945	8449	7,22
E-ONE Vector (BEV)	BEV	0	18 500	4993	3794	0,22
Emergency One EV0 (BEV)	BEV	0	18 500	4993	3794	0,22

от зарядной инфраструктуры, особенно в условиях низких температур.

Таким образом, гибридные автомобили выступают как наиболее сбалансированный вариант на текущем этапе модернизации: они обеспечивают значительное снижение затрат и выбросов при сохранении эксплуатационной надежности. Полностью электрические модели демонстрируют максимальный экологический эффект, но их широкое внедрение возможно лишь при развитии инфраструктуры и снижении стоимости технологий.

Адаптация к условиям Беларуси. *Климатические особенности.* Эксплуатация пожарных автомобилей в условиях низких температур (до -20°C и ниже) сопровождается снижением емкости аккумуляторных батарей на 20–30 % и увеличением энергопотребления за счет работы систем отопления [25]. Для компенсации этих факторов необходимы встроенные системы термостатирования и хранение техники в отапливаемых помещениях. Подобные решения уже применяются в зарубежных образцах (Rosenbauer RTX, Pierce Volterra), что подтверждает их эффективность.

Инфраструктурные ограничения. Для внедрения электрифицированных пожарных автомобилей требуется оснащение пожарных частей зарядными станциями мощностью не менее 100–150 кВт. При этом использование ночного тарифа (0,205 бел. руб./кВт·ч) позволяет снизить эксплуатационные расходы и одновременно разгрузить энергосистему в часы пикового потребления. С учетом ввода в эксплуатацию Белорусской атомной электростанции использование ночной электроэнергии с низким углеродным профилем обеспечивает дополнительный экологический эффект.

Экономические факторы. Гибридные модели позволяют сократить расходы на топливо в 1,5–2 раза и снизить выбросы CO_2 более чем на 50 %. В условиях Беларуси гибридные решения могут рассматриваться как оптимальный переходный этап, позволяющий совместить экономию ресурсов с эксплуатационной надежностью благодаря резервному дизельному двигателю.

Нормативное регулирование. Действующая национальная база (СТБ, ТНПА) требует адаптации к международным стандартам EN 1846, NFPA 1901 и NFPA 414 [19–21]. Гармонизация нормативов позволит обеспечить соответствие белорусской техники международным требованиям по безопасности, надежности и экологической эффективности.

Пилотные проекты. Для практической апробации рекомендуется внедрение 1–2 гибридных автомобилей в подразделениях г. Минска, где высокая плотность вызовов и значительный экологический эффект от снижения выбросов. На основе данных об эксплуатации возможно проведение уточненных расчетов энергозатрат, разработка методических рекомендаций и формирование

национальной программы поэтапного перехода к электрифицированным пожарным машинам.

Заключение. Сравнительный анализ пожарных автомобилей с дизельными, гибридными и электрическими силовыми установками подтвердил эффективность внедрения электрифицированных решений. Гибридные модели (Rosenbauer RT/RTX, Pierce Volterra) снижают годовые эксплуатационные затраты до 50 % и уменьшают выбросы CO_2 примерно на 70 % по сравнению с дизельным автомобилем АЦ 5,0-40 (МАЗ-5309). Полностью электрические аналоги (E-ONE Vector, Emergency One EV0) обеспечивают сокращение выбросов более чем на 98 % и снижение затрат до 75 %, однако ограничены высокой стоимостью и зависимостью от развитой зарядной инфраструктуры. Аэродромный гибрид Ziegler Z6 HYBRIDdrive продемонстрировал умеренные показатели (снижение затрат на 40 % и выбросов на 50 %), но обеспечивает высокую производительность в специфических условиях эксплуатации.

Предложена и апробирована методика комплексной оценки эффективности пожарных автомобилей с различными типами силовых установок, учитывающая эксплуатационные режимы, климатические факторы и специфику энергетической системы Беларуси, характеризующейся низкоуглеродным профилем за счет использования атомной генерации.

Результаты исследования позволяют определить гибридные автомобили как наиболее целесообразный переходный этап модернизации парка пожарной техники Беларуси. Они обеспечивают значительное снижение затрат и выбросов при сохранении эксплуатационной надежности за счет наличия резервного дизельного двигателя.

Дальнейшее развитие связано с проведением натурных испытаний гибридных автомобилей в подразделениях МЧС Республики Беларусь, уточнением фактических эксплуатационных затрат и надежности в стране. Также необходима адаптация национальных стандартов (СТБ, ТНПА) к международным требованиям (EN 1846, NFPA 1901, NFPA 414) и разработка программ поэтапного внедрения электрифицированной техники. В долгосрочной перспективе возможно расширение доли полностью электрических автомобилей и их интеграция с возобновляемыми источниками энергии.

Список литературы

1. Climate change 2014: mitigation of climate change / ed. O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona [et al.]. — Cambridge: Cambridge University Press, 2014. — 1435 p.
2. Standard for aircraft rescue and firefighting vehicles, automotive fire apparatus, wildland fire apparatus, and automotive ambulances: NFPA 1900:2024. — Publ. date: 27.10.2022. — Quincy: National Fire Protection Association, 2024. — 380 p.
3. Standard for aircraft rescue and fire-fighting vehicles: NFPA 414:2020. — Publ. date: 18.05.2019. — Quincy: National Fire Protection Association, 2020. — 98 p.

4. Standard for Automotive Fire Apparatus: NFPA 1901:2016. — Publ. date: 07.09.2015. — Quincy: National Fire Protection Association, 2016. — 216 p.
5. Directive (EU) 2019/1161 — Clean Vehicles Directive // Official Journal of the European Union. — 2019. — 18 p. — URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/1161/oj/eng> (date of access: 17.09.2025).
6. Operational features of battery-powered electric vehicles in Russia and methods of assessing a state of health of traction batteries / R. Biksaleev, A. Klimov, R. Malikov, K. Karpukhin // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2061. — DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2061/1/012013>.
7. Karpukhin, K. The creation of energy efficient hybrid vehicles in the Russian Federation / K. Karpukhin, A. Terenchenko // Combustion Engines. — 2017. — Vol. 168(1). — P. 145–148. — DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-2017-123>.
8. Analysis of the current state and prospects for public electric transport in Russian cities / A. Smirnov, E. Smolokurov, A. Mazhazhikhov, E. Tsukanova // E3S Web of Conferences. — 2022. — Vol. 363. — 10 p. — DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236301007>.
9. Degradation of lithium-ion batteries in an electric transport complex / N.I. Shchurov, S.I. Dedov, B.V. Molozhomov [et al.] // Energies. — 2021. — Vol. 14, iss. 23. — DOI: <https://doi.org/10.3390/en14238072>.
10. Temperature control of the battery for hybrid or electric vehicle / K.E. Karpukhin, A.S. Terenchenko, A.A. Shorin [et al.] // Bio-sciences Biotechnology Research Asia. — 2015. — Vol. 12, no. 2. — P. 1297–1301.
11. RTX / Revolutionary Technology // Rosenbauer. — URL: <https://rosenbaueramerica.com/rosenbauer-revolutionary-technology/> (date of access: 17.09.2025).
12. RTX US Brochure v6 // Rosenbauer. — URL: https://www.rosenbauer.com/Sharepoint/VehiclesRT/Documents/PM91x_RT_Brochure-RT_EN.pdf (date of access: 17.09.2025).
13. Five new, fully electric RT vehicles for the Berlin Fire Department // Rosenbauer Group. — URL: <https://www.rosenbauer.com/News/News-Hub/Fachpresse/2024/07/5-elektrische-rt/rosenbauer-press-release-5-electric-rt-en.pdf> (date of access: 17.09.2025).
14. LAFD chief debuts arrival of first electric fire engine // Los Angeles Fire Department. — URL: <https://lafd.org/news/lafd-chief-debuts-arrival-first-electric-fire-engine> (date of access: 17.09.2025).
15. Vancouver welcomes Canada's first electric fire engine // City of Vancouver. — URL: <https://vancouver.ca/news-calendar/first-electric-fire-engine-in-canada-dec-2023.aspx> (date of access: 17.09.2025).
16. Electric fire truck overview // Pierce Manufacturing. — URL: <https://www.piercemfg.com/electric-fire-trucks/pierce-volterra> (date of access: 17.09.2025).
17. First production Pierce Volterra electric pumper now in service in Madison // City of Madison. — URL: <https://www.cityofmadison.com/news/2025-02-19/first-production-pierce-volterra-electric-pumper-now-in-service-in-madison> (date of access: 17.09.2025).
18. Case Study: The City of Madison Fire Department's pioneering adoption of the Pierce Volterra electric fire truck // Pierce Manufacturing. — 16.07.2025. — URL: <https://www.piercemfg.com/pierce/blog/city-of-madison-electric-fire-truck-case-study> (date of access: 17.09.2025).
19. Vector 100 % electric power. Endurance performance // E-ONE. — URL: https://e-one.com/wp-content/uploads/2023/12/Vector_Spec-Sheet_E-ONE_122823.pdf (date of access: 17.09.2025).
20. EV0 Electric Fire Appliance // Emergency One. — URL: <https://elgroup.co.uk/wp-content/uploads/2024/06/DATA-110a-E1-EV0.pdf> (date of access: 17.09.2025).
21. An introduction to zero emission fire & rescue fleets // Cenex. — URL: <https://www.cenex.co.uk/app/uploads/2023/04/FireRescue.pdf> (date of access: 17.09.2025).
22. World's first ARFF with HYBRIDdrive Technology sold to customer // Ziegler Group. — URL: <https://www.ziegler.de/en/news-info/world2019s-first-arff-with-hybriddrive-technology-sold-to-customer> (date of access: 17.09.2025).
23. Scania hybrid engine in airport fire truck // Scania. — URL: https://www.scania.com/ph/en/home/about-scania/newsroom/news/2023/scania_hybrid_engine_in_airport_fire_truck.html (date of access: 17.09.2025).
24. Electricity in Belarus in 2024 // LowCarbonPower. — 2025. — URL: <https://lowcarbonpower.org/region/Belarus> (date of access: 17.09.2025).
25. Lithium-ion batteries under low-temperature environment / H. Luo, Y. Zhang, Q. Zhang [et al.] // Materials. — 2022. — Vol. 15, iss. 22. — DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15228166>.
26. Emission factors for greenhouse gas inventories // U.S. Environmental Protection Agency. — Washington: EPA, 2021. — 16 p.
27. Carbon dioxide emissions coefficients by fuel // U.S. EIA. — URL: https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php (date of access: 17.09.2025).
28. Carbon intensity of electricity generation // Our World in Data. — URL: <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity> (date of access: 17.09.2025).
29. Nuclear energy // Our World in Data. — URL: <https://ourworldindata.org/nuclear-energy> (date of access: 17.09.2025).
30. The Nuclear Fuel Cycle // World Nuclear Association. — London: WNA, 2020. — 52 p. — URL: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview> (date of access: 17.09.2025).

STARAVOITAU Yauheni D.

Lecturer of the Department of Fire and Rescue Equipment¹

E-mail: jenya_starow@mail.ru

PODDUBKO Sergey N., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Director General²

E-mail: info@oim.by

PIVOVAROV Alexander V.

Lecturer of the Department of Emergency Response¹

E-mail: sasha1500vo@list.ru

¹University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received September 29, 2025.

COMPARATIVE ANALYSIS OF EFFICIENCY OF FIRE TRUCKS WITH TRADITIONAL, HYBRID AND ELECTRIC POWER UNITS

The paper presents a comparative analysis of fire trucks with different types of power units, diesel, hybrid and fully electric. The study included general-purpose models: ATs 5.0-40 (MAZ-5309 chassis), Rosenbauer RT/RTX, Pierce Volterra, E-ONE Vector and Emergency One EV0, all of them are classified according to STB 11.13.04-2009 as heavy fire tankers with a gross vehicle weight of more than 14 t. All models have comparable weight in the range of 18–24 t, which ensures the validity of the comparison. In addition, a specialized airport fire truck Ziegler Z6 HYBRIDdrive was analyzed, which also belongs to the heavy class, but has a significantly higher mass (40 t) and is designed for use in specific conditions. The methodology was based on the calculation of energy consumption and CO₂ emissions using typical operational modes: annual mileage, pump operation time and idle time, with reference fuel and electricity consumption rates. It was found that hybrid fire trucks reduce operating costs by up to 50 % and CO₂ emissions by up to 70 % compared to diesel analogues, while fully electric models achieve over 98 % reduction of emissions. The scientific novelty lies in the application of a comprehensive methodology for assessing fire trucks with different types of power units adapted to the conditions of the Republic of Belarus, taking into account its low-carbon electricity profile. The practical significance is determined by the fact that hybrid fire trucks can serve as an optimal transitional stage of fleet modernization, combining ecological efficiency with operational reliability.

Keywords: fire truck, hybrid power unit, electric drive, environmental efficiency, fuel saving, Rosenbauer RT, Pierce Volterra, Ziegler Z6 HYBRIDdrive, E-ONE Vector, Emergency One EV0

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-5-11>

References

1. *Climate change 2014: mitigation of climate change*. Cambridge, Cambridge University Press, 2014. 1435 p.
2. NFPA 1900:2024. *Standard for aircraft rescue and firefighting vehicles, automotive fire apparatus, wildland fire apparatus, and automotive ambulances*. Quincy, National Fire Protection Association, 2024. 380 p.
3. NFPA 414:2020. *Standard for aircraft rescue and fire-fighting vehicles*. Quincy, National Fire Protection Association, 2020. 98 p.
4. NFPA 1901:2016. *Standard for automotive fire apparatus*. Quincy: National Fire Protection Association, 2016. 216 p.
5. *Directive (EU) 2019/1161 — clean vehicles directive*. 2019. 18 p. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/1161/oj/eng> (accessed September 17, 2025).
6. Biksaleev R., Klimov A., Malikov R., Karpukhin K. Operational features of battery-powered electric vehicles in Russia and methods of assessing a state of health of traction batteries. *Journal of physics: conference series*, 2021, vol. 2061. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2061/1/012013>.
7. Karpukhin K., Terenchenko A. The creation of energy efficient hybrid vehicles in the Russian Federation. *Combustion engines*, 2017, vol. 168(1), pp. 145–148. DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-2017-123>.
8. Smirnov A., Smolokurov E., Mazhazhikhov A., Tsukanova E. Analysis of the current state and prospects for public electric transport in Russian cities. *E3S web of conferences*, 2022, vol. 363, 10 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236301007>.
9. Shchurov N.I., et al. Degradation of lithium-ion batteries in an electric transport complex. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 23. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14238072>.
10. Karpukhin K.E., et al. Temperature control of the battery for hybrid or electric vehicle. *Biosciences biotechnology research Asia*, 2015, vol. 12, no. 2, pp. 1297–1301.
11. *RTX / revolutionary technology*. Available at: <https://rosenbaueramerica.com/rosenbauer-revolutionary-technology/> (accessed September 17, 2025).
12. *RTX US Brochure v6*. Available at: https://www.rosenbauer.com/Sharepoint/VehiclesRT/Documents/PM91x_RT_Brochure-RT_EN.pdf (accessed September 17, 2025).
13. *Five new, fully electric RT vehicles for the Berlin Fire Department*. Available at: <https://www.rosenbauer.com/News/News-Hub/Fachpresse/2024/07/5-elektrische-rt/rosenbauer-press-release-5-electric-rt-en.pdf> (accessed September 17, 2025).
14. *LAFD chief debuts arrival of first electric fire engine*. Available at: <https://lafd.org/news/lafd-chief-debuts-arrival-first-electric-fire-engine> (accessed September 17, 2025).
15. *Vancouver welcomes Canada's first electric fire engine*. Available at: <https://vancouver.ca/news-calendar/first-electric-fire-engine-in-canada-dec-2023.aspx> (accessed September 17, 2025).
16. *Electric fire truck overview*. Available at: <https://www.piercemfg.com/electric-fire-trucks/pierce-volterra> (accessed September 17, 2025).
17. *First production Pierce Volterra electric pumper now in service in Madison*. Available at: <https://www.cityofmadison.com/news/2025-02-19/first-production-pierce-volterra-electric-pumper-now-in-service-in-madison> (accessed September 17, 2025).
18. *Case study: The City of Madison Fire Department's pioneering adoption of the Pierce Volterra electric fire truck*. Available at: <https://www.piercemfg.com/pierce/blog/city-of-madison-electric-fire-truck-case-study> (accessed September 17, 2025).
19. *Vector 100 % electric power. Endurance performance*. Available at: https://e-one.com/wp-content/uploads/2023/12/Vector-Spec-Sheet_E-ONE_122823.pdf (accessed September 17, 2025).
20. *EV0 electric fire appliance*. Available at: <https://e1group.co.uk/wp-content/uploads/2024/06/DATA-110a-E1-EV0.pdf> (accessed September 17, 2025).
21. *An introduction to zero emission fire & rescue fleets*. Available at: <https://www.cenex.co.uk/app/uploads/2023/04/FireRescue.pdf> (accessed September 17, 2025).
22. *World's first ARFF with HYBRIDdrive Technology sold to customer*. Available at: <https://www.ziegler.de/en/news-info/world2019s-first-arff-with-hybriddrive-technology-sold-to-customer> (accessed September 17, 2025).
23. *Scania hybrid engine in airport fire truck*. Available at: https://www.scania.com/ph/en/home/about-scania/newsroom/news/2023/scania_hybrid_engine_in_airport_fire_truck.html (accessed September 17, 2025).
24. *Electricity in Belarus in 2024*. Available at: <https://lowcarbonpower.org/region/Belarus> (accessed September 17, 2025).
25. Luo H., et al. Lithium-ion batteries under low-temperature environment. *Materials*, 2022, vol. 15, iss. 22. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15228166>.
26. *Emission factors for greenhouse gas inventories*. Washington, EPA, 2021. 16 p.
27. *Carbon dioxide emissions coefficients by fuel*. Available at: https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php (accessed September 17, 2025).
28. *Carbon intensity of electricity generation*. Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity> (accessed September 17, 2025).
29. Ritchie H., Rosado P. *Nuclear energy*. Available at: <https://ourworldindata.org/nuclear-energy> (accessed September 17, 2025).
30. *The nuclear fuel cycle*. London, WNA, 2020. 52 p. Available at: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview> (accessed September 17, 2025).