

СОПОСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ И НОРМ РАСХОДА ТОПЛИВА АВТОМОБИЛЯ С ДВС В ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ (НА ПРИМЕРЕ ТРАССЫ КУЛЯБ – ШОХОН)»

Абдулло Мамадамон, Саъдуллозода Шахриёр, Сайфиддинзода Одил

Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

Проведено сопоставление действующей в Республике Таджикистан методики дифференцированных норм расхода топлива для автомобилей с ДВС и предложенной физико-математической модели энергопотребления электромобиля с системой рекуперативного торможения. Оценка выполнена на горном маршруте Куляб – Шамсиддин Шохин – Шохон (64 км, перевал 1980 м). Для бензинового автомобиля массой 2100 кг (базовый расход 10 л/100 км) высотная надбавка дает прирост расхода на 9,8% (с 6,40 до 7,03 л). Для электромобиля аналогичной массы при базовом горизонтальном расходе 7,41 кВт·ч подъем увеличивает энергопотребление до 9,09 кВт·ч (+22,7%), а обратный спуск за счет рекуперации снижает его до 5,93 кВт·ч (–20,0%). Разница между направлениями достигает 3,2 кВт·ч, а средний расход за круговой рейс (7,51 кВт·ч) превышает базовый лишь на 1,4%. Установлено, что существующие нормативные методики, применяющие одинаковые высотные надбавки в обоих направлениях, не учитывают возврат гравитационной работы через рекуперацию. Это обосновывает необходимость пересмотра принципов нормирования эксплуатационных характеристик электрифицированного транспорта. При действующих в Таджикистане тарифах удельные эксплуатационные затраты на маршруте различаются в 22–26 раз в пользу электромобиля.

Ключевые слова: электромобиль; дифференцированные нормы расхода топлива; горная эксплуатация; рекуперативное торможение; коэффициент высотной корректировки; сравнительный анализ; Республика Таджикистан.

КИЁСИ МОДЕЛҲОИ ИСТЕЪМОЛИ ЭНЕРГИЯИ ЭЛЕКТРОМОБИЛ ВА МЕЪЁРҲОИ САРФИ СӢЗИШВОРИИ АВТОМОБИЛИ ДОРОИ МДС ДАР ШАРОИТИ КӢҲИСТОН (ДАР МИСОЛИ ҚИТӢАИ РОҲИ КӢЛОБ – ШОҲОН)

Абдулло Мамадамон, Саъдуллозода Шахриёр, Сайфиддинзода Одил

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола киёси усули амалкунандаи меъёрҳои тафриқавии сарфи сӯзишворӣ барои автомобилҳои дорои муҳаррики сӯзиши дохилӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон ва модели пешниҳодшудаи физикию математикии истеъмоли энергияи электромобил бо системаи тормоздиҳии рекуперативӣ гузаронида шудааст. Арзёбӣ дар ҳатсайри кӯҳии Кӯлоб – Шамсиддин Шохин – Шохон (64 км, ағба дар баландии 1980 м) иҷро гардид. Барои автомобили бензинии дорои массаи 2100 кг (меъёри заминавӣ 10 л/100 км) иловапулии баландӣ афзоиши сарфро 9,8% (аз 6,40 то 7,03 л) ташкил медиҳад. Барои электромобили дорои ҳамон тавсифоти массивию андозавӣ ҳангоми сарфи заминавии уфуқии 7,41 кВт·соат, баромад ба баландӣ истеъмоли энергияро то 9,09 кВт·соат (+22,7%) зиёд мекунад, вале фаромадани бозгашт аз ҳисоби рекуператсия онро то 5,93 кВт·соат (–20,0%) коҳиш медиҳад. Фарқияти байни самтҳо ба 3,2 кВт·соат мерасад ва сарфи миёна дар сафари даврагӣ (7,51 кВт·соат) аз нишондиҳандаи заминавӣ ҳамагӣ 1,4% зиёд аст. Муайян карда шуд, ки усулҳои меъёрии амалкунанда, ки дар ду самти ҳаракат иловапулиҳои якхелаи баландиро татбиқ мекунанд, бозгашти қори гравитатсиониро тавассути тормоздиҳии рекуперативӣ ба назар намегиранд. Ин зарурати азнавирии принципҳои меъёрбандии тавсифоти истифодабарии нақлиёти барқиро асос мебахшад. Ҳангоми тарифҳои амалкунанда дар Тоҷикистон фарқияти хароҷоти мушаххаси истифодабарӣ дар ин ҳатсайр 22–26 маротиба ба фоидаи электромобилро ташкил медиҳад.

Калидвожаҳо: автомобили барқӣ; меъёрҳои дифференсалии харҷи сӯзишворӣ; истифода дар кӯҳистон; боздории рекуперативӣ; коэффициентҳои танзими баландӣ; таҳлили муқоисавӣ; Ҷумҳурии Тоҷикистон.

COMPARISON OF ELECTRIC VEHICLE ENERGY CONSUMPTION MODELS AND INTERNAL COMBUSTION ENGINE VEHICLE FUEL CONSUMPTION STANDARDS IN MOUNTAINOUS CONDITIONS (CASE STUDY: KULOB – SHOHON ROUTE)

Abdullo Mamadamon, Sadullozoda Shahriyor, Sayfiddinzoda Odil

Tajik Technical University named after academician M. S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

This paper presents a comparative analysis between the fuel consumption standards for internal combustion engine vehicles currently effective in the Republic of Tajikistan and a previously proposed physical-mathematical model for electric vehicle energy consumption with regenerative braking. The evaluation was conducted on a challenging mountainous route, Kulyab – Shamsiddin Shohin – Shohon (64 km, mountain pass at 1980 m). For a gasoline vehicle weighing 2100 kg (base rate of 10 L/100 km), the elevation surcharge increases consumption by 9.8% (from 6.40 to 7.03 L). For an electric vehicle of equivalent mass, given a baseline flat-terrain consumption of 7.41 kWh, uphill driving increases energy consumption to 9.09 kWh (+22.7%), whereas downhill driving with regenerative braking reduces it to 5.93 kWh (–20.0%). The directional disparity reaches 3.2 kWh, while the average round-trip consumption (7.51 kWh) exceeds the baseline horizontal value by only 1.4%. It

is shown that existing standardized methodologies applying equal elevation surcharges in both directions fail to account for the recovery of gravitational potential energy via regenerative braking. These findings justify the necessity of revising operational performance assessment methodologies for electrified transport. Under current electricity and fuel tariffs in Tajikistan, the difference in specific operating costs along this route reaches 22–26 times in favor of the electric vehicle.

Keywords: *electric vehicle; differentiated fuel consumption standards; mountain operation; regenerative braking; altitude adjustment coefficient; comparative analysis; Republic of Tajikistan.*

1. Введение (Introduction)

Автомобильный транспорт в Республике Таджикистан эксплуатируется в условиях, существенно отличающихся от нормальных: значительная часть территории страны горная местность с перевалами выше 2000 м [3]. Для учёта повышенного расхода топлива автомобилями с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) при работе в горных условиях действует методика дифференцированных норм расхода, разработанная ранее одним из авторов настоящей работы совместно с коллегами [3]. Методика основана на корректировке линейной нормы расхода топлива через ступенчатую надбавку, зависящую от высоты работы автомобиля над уровнем моря, а также предлагает непрерывную форму поправки на основе барометрической зависимости атмосферного давления от высоты.

Рост парка электрифицированного транспорта во всём мире ставит перед транспортной наукой Республики Таджикистан вполне конкретную задачу: нужны рабочие методики оценки энергопотребления электромобилей именно в горных условиях [13, 21].

Электромобиль отличается от машины с двигателем внутреннего сгорания в двух принципиальных моментах. Во-первых, его силовая установка не зависит от плотности атмосферного воздуха — энергия уже запасена в электрохимическом виде в батарее. Во-вторых, он оснащён системой рекуперативного торможения, которая возвращает в батарею часть энергии, потраченной на подъём, когда автомобиль идёт под уклон [15, 16]. Именно эти две особенности невозможно корректно учесть в методике дифференцированных норм, разработанной когда-то для транспорта с ДВС.

Ранее была предложена численно устойчивая физико-математическая модель энергопотребления электромобиля с системой круиз-контроля при движении по маршруту с произвольным профилем высот [4]. Модель записана в виде системы из пяти обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка и интегрируется явным методом Рунге–Кутты четвёртого порядка. Гладкая аппроксимация переключения между режимами тяги и рекуперации на основе гиперболического тангенса обеспечивает устойчивость расчёта на всём диапазоне рабочих режимов.

Цель настоящей работы сопоставить количественные оценки расхода энергии, которые дают две разные методики, применительно к реальному горному маршруту. И уже на этом сравнении обсудить методологические различия, от которых напрямую зависит выбор инструмента для оценки эксплуатационных характеристик электрифицированного транспорта в условиях Республики Таджикистан.

2. Материалы и методы (Materials and methods)

2.1. Методика дифференцированных норм расхода топлива для автомобиля с ДВС

Согласно методике [3] и действующим методическим рекомендациям, индивидуальная линейная норма расхода топлива автомобиля с ДВС при работе в горных условиях определяется по формуле:

$$Q = \frac{H_s \cdot S + H_w \cdot W}{100} \cdot K_h,$$

где Q — линейная норма расхода топлива, л/100 км; S — пробег автомобиля, км; H_w — удельная норма расхода на транспортную работу, л/100 т·км; W — транспортная работа автомобиля, т·км; K_h — коэффициент высотной корректировки нормы.

Ступенчатая форма коэффициента K_h принимает фиксированные значения в зависимости от высотного диапазона.

$$K_h(h) = \begin{cases} 1,00, & h < 500 \text{ м}, \\ 1,05, & 500 \leq h < 1500 \text{ м}, \\ 1,10, & 1500 \leq h < 2000 \text{ м}, \\ 1,15, & 2000 \leq h < 3000 \text{ м}, \\ 1,20, & h \geq 3000 \text{ м}. \end{cases}$$

В работе [3] предложена и непрерывная форма этого коэффициента. Она строится на барометрической зависимости атмосферного давления от высоты:

$$K_h = \sqrt{\frac{P_0}{P_H}},$$

где P_0 — атмосферное давление на уровне моря, P_H — атмосферное давление на рабочей высоте. Для практических расчётов используется зависимость $P_H/P_0 = (1 - h/44330)^{5,255}$, следующая из стандартной атмосферной модели [9].

Физический смысл такой поправки понятен: с ростом высоты падает плотность воздуха и, как следствие, массовый заряд цилиндра. Экспериментальные исследования работы двигателей внутреннего сгорания на больших высотах это подтверждают — эффективная мощность снижается, а удельный расход топлива растёт [20].

Сравнение обеих форм коэффициента $K_h(h)$ с указанием высотного диапазона рассматриваемого маршрута приведено на рис. 1. Зелёной штриховкой отмечен участок высот маршрута Куляб – Шохон (600–1980 м). В этом диапазоне обе формулы дают близкие значения. Наибольшее расхождение наблюдается вблизи перевала: непрерывная форма превышает ступенчатое значение примерно на несколько процентных пунктов.

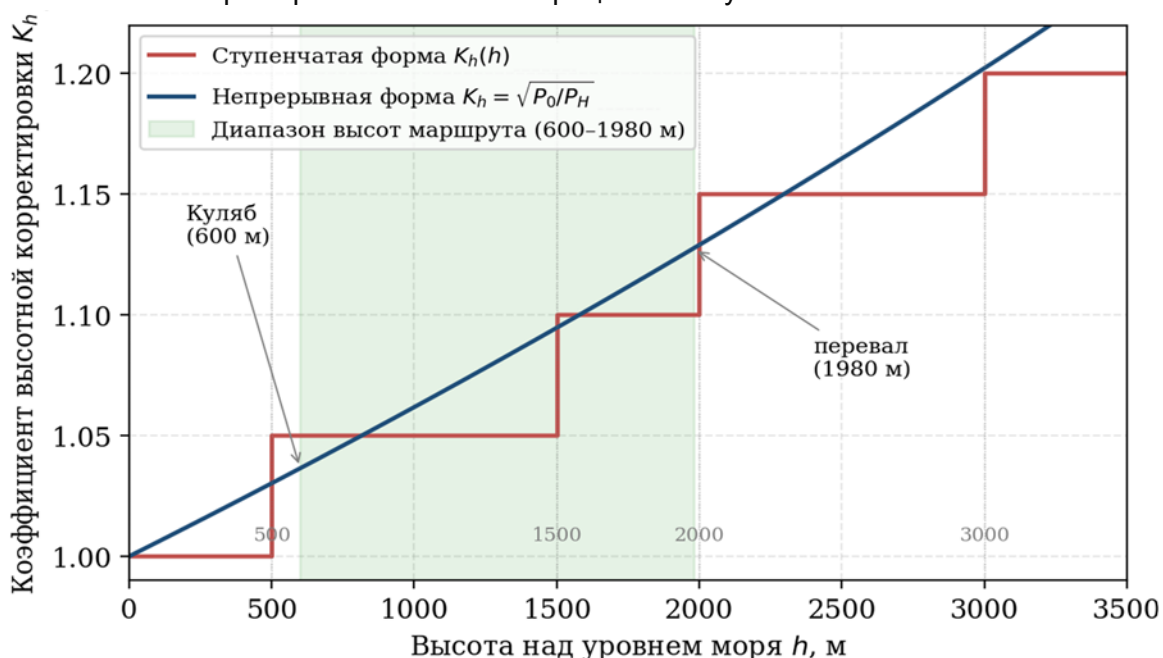


Рисунок 1 – Сравнение ступенчатой и непрерывной форм коэффициента высотной коррективы $K_h(h)$ по методике [3].

Figure 1 – Comparison of the step and continuous forms of the altitude correction coefficient $K_h(h)$ according to the method [4].

2.2. Физико-математическая модель энергопотребления электромобиля

Полное описание модели, обоснование её численной устойчивости и результаты верификации приведены в работе [2]. Здесь лишь краткое изложение методической основы.

Структура модели выстроена в русле подходов, уже принятых в мировой практике: расчёт энергопотребления электромобиля через мгновенную механическую мощность на колесе [7], построение тягового электропривода [6] и управление энергопотоками силовой установки [11].

Модель формулируется как система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка относительно пятимерного вектора состояния.

$$\mathbf{Y} = [s, v, \text{err}, \text{SOC}, E_{\text{net}}]^T$$

Его компоненты: положение автомобиля s на маршруте (м), скорость v (м/с), накопленная ошибка слежения регулятора err (м), степень заряда батареи SOC и накопленное потребление электрической энергии E_{net} (Дж). Пропорционально-интегральный круиз-контроль формирует силу тяги F_{trac} по отклонению текущей скорости от целевой v_{target} .

Полная сила сопротивления движению включает три составляющие: гравитационную, сопротивление качению и аэродинамическую [8, 14].

$$F_{\text{res}}(v, s) = m \cdot g \sin(\theta(s)) + m \cdot g \cdot C_r \cos(\theta(s)) + 1/2 \rho_{\text{air}} C_d A v^2.$$

Профиль высоты дороги $H(s)$ восстанавливается кубическим сплайном по опорным точкам геодезических измерений; угол наклона вычисляется непосредственно из этого сплайна ($\theta(s) = \arctan(dH/ds)$).

Электрическая часть модели описывает батарею простейшей эквивалентной схемой Тевенина [12]. Ток батареи определяется в замкнутой форме через дискриминант квадратного уравнения мощности.

$$I_{\text{bat}}(P_{\text{bat}}) = \frac{V_{\text{oc}} - \sqrt{V_{\text{oc}}^2 - 4R_{\text{int}}P_{\text{bat}}}}{2R_{\text{int}}}.$$

И вот здесь появляется ключевой методологический ход. Чтобы избежать разрыва производной в точке переключения между тягой и рекуперативным торможением, используется гладкая аналитическая аппроксимация на основе гиперболического тангенса. Этот приём устраняет разрыв и полностью восстанавливает четвёртый порядок точности численного интегрирования [4].

3. Результаты (Results)

3.1. Объект сопоставления

Для сопоставления двух методик выбран реальный участок автомобильной дороги, соединяющий Куляб с населённым пунктом Шохон через перевал Шамсиддин Шохин в Хатлонской области. Общая протяжённость маршрута 64 км.

По результатам натурных измерений высоты опорных точек составляют: 600 м в начальной точке в Кулябе, 1980 м на перевале Шамсиддин Шохин (20-й километр от Куляба) и 860 м в конечной точке в Шохоне. Чистый набор высоты в направлении от Куляба к Шохону равен +260 м. При этом промежуточный подъём достигает 1380 м (средний градиент 6,9 % на участке 0–20 км), а последующий спуск 1120 м (средний градиент 2,5 % на участке 20–64 км). В рамках модели [4] профиль высоты восстанавливается кубическим сплайном через эти три опорные точки.

Массово-габаритные и энергетические характеристики условного автомобиля-аналога, принятые в обеих методиках, соответствуют современному среднему транспортному средству D-сегмента: масса 2100 кг, лобовая площадь 2,45 м², аэродинамический коэффициент 0,28. Выбор параметров опирается на методологию энергетического анализа подсистем транспортного средства [5, 18]. Техническое состояние автомобиля-аналога принято соответствующим требованиям эксплуатационной безопасности [1, 2]. Плотность воздуха задана для нормальных условий [19], её изменение с высотой по стандартной атмосферной модели [9].

Для физической модели дополнительно введены: коэффициент сопротивления качению 0,012, номинальная энергоёмкость батареи 75 кВт·ч, коэффициенты полезного действия трансмиссии, двигателя и рекуперации 0,97, 0,95 и 0,90 соответственно. Целевая скорость поддерживается постоянной на уровне 60 км/ч. Такой выбор базового режима согласуется с практикой энергооптимального управления скоростью электромобиля [23].

Для методики дифференцированных норм принята базовая линейная норма расхода топлива, характерная для бензинового двигателя массового автомобиля D-сегмента без транспортной работы.

3.2. Результаты сопоставления

Расчёт по методике дифференцированных норм для автомобиля с ДВС даёт следующие результаты. Базовый расход топлива без учёта горных условий составляет определённое значение.

Ступенчатая форма коэффициента корректировки, усреднённая вдоль профиля маршрута с шагом 10 м, приводит к эффективному значению, соответствующему расходу 7,03 л, что на 9,8 % выше базового. Непрерывная форма коэффициента даёт расход 7,07 л (+10,5 %).

Расхождение между ступенчатой и непрерывной формами на рассматриваемом маршруте не превышает 0,7 процентных пункта. Такой результат хорошо согласуется с выводами работы работы [3] о сопоставимости обоих подходов на маршрутах, которые не выходят за границы отдельных высотных зон.

Теперь расчёт по физико-математической модели [4] для электромобиля с идентичными массово-габаритными характеристиками. Базовое значение чистого потребления электроэнергии на горизонтальном маршруте составляет определённую величину. При движении по реальному профилю в направлении Куляб → Шохон чистое потребление вырастает до 9,09 кВт·ч, а это уже +22,7 % к базе. В обратном направлении оно падает до 5,93 кВт·ч (–20,0 %).

Если усреднить по круговому рейсу, получается 7,51 кВт·ч. Превышение над базовым значением составляет всего 1,4 %. Все полученные результаты сведены в таблицу 1.

4. Обсуждение (Discussions)

Полученное сопоставление выявляет три методологически значимых наблюдения.

Во-первых, обе формы коэффициента высотной корректировки в методике дифференцированных норм [3] ступенчатая и непрерывная, дают близкие численные значения для рассматриваемого маршрута. Это ожидаемо: основная часть пути лежит в едином высотном диапазоне 1500–2000 м, где ступенчатая функция близка к соответствующему значению непрерывной формулы. Расхождение может заметно вырасти на маршрутах, которые пересекают границы высотных зон. Там ступенчатая функция терпит разрыв, а непрерывная обеспечивает монотонный переход.

Таблица 1 – Сравнение оценок расхода энергии/топлива на маршруте Куляб – Шохон по различным методикам
Table 1 – Comparison of energy/fuel consumption estimates on the Kulyab – Shohon route using various methods

Методика	Расход	Отклонение от базового ($\chi \equiv 0$)
Автомобиль с ДВС, базовый ($\chi \equiv 0$, $K_h = 1$)	6,40 л	—
Автомобиль с ДВС, ступенчатые надбавки [3]	7,03 л	+9,8%
Автомобиль с ДВС, непрерывная формула $K_h = \sqrt{P_0/P_H}$ [3]	7,07 л	+10,5%
Электромобиль, базовый ($\chi \equiv 0$, плоский маршрут) [2]	7,41 кВт·ч	—
Электромобиль, Куляб → Шохон [4]	9,09 кВт·ч	+22,7%
Электромобиль, Шохон → Куляб [4]	5,93 кВт·ч	–20,0%
Электромобиль, Куляб → Шохон → Куляб, среднее [4]	7,51 кВт·ч	+1,4%

Во-вторых, обе формы норм [3] дают одну и ту же величину надбавки в оба направления движения. Они зависят исключительно от высоты работы автомобиля. Такая инвариантность физически оправдана для ДВС. Потери на подъём безвозвратны: гравитационная работа рассеивается в тормозной системе на спуске в виде тепла. Кроме того, коэффициент отражает не только затраты энергии на подъём, но и снижение эффективности рабочего цикла двигателя при пониженном атмосферном давлении. Этот эффект тоже не зависит от направления.

В-третьих, физико-математическая модель [4] для электромобиля обнаруживает существенную асимметрию энергопотребления. В направлении с чистым подъёмом расход растёт на 22,7 %, в обратном падает на 20,0 % относительно базового горизонтального значения. Качественно это согласуется с результатами натурных исследований влияния продольного уклона [10, 21]. Однако при усреднении по круговому рейсу превышение составляет всего 1,4 % и практически совпадает с базовым значением плоского маршрута.

Именно здесь проявляется эффект рекуперативного торможения. Значительная часть гравитационной работы, затраченной на подъём, возвращается в батарею на последующем спуске [15, 16]. С точностью до потерь в трансмиссии, двигателе и электрохимической части батареи круговой маршрут в горах для электромобиля оказывается энергетически близок к движению по равнине.

Это свойство электрифицированного транспорта невозможно отразить в методике дифференцированных норм. Структура норм [3] исключает и отрицательные надбавки, и зависимость от направления движения. Более того, физические основания для введения барометрической зависимости, справедливые для ДВС (снижение массового расхода кислорода и связанное с ним падение эффективности цикла [20]), для электромобиля просто не работают. Батарея и тяговый двигатель сохраняют одинаковую эффективность независимо от высоты. Единственный высотно-зависимый эффект — снижение аэродинамического сопротивления из-за меньшей плотности воздуха действует в противоположную сторону: он уменьшает, а не увеличивает расход энергии.

Полученные наблюдения обосновывают целесообразность разработки специализированной методики оценки эксплуатационных характеристик электрифицированного транспорта в горных условиях. Такая методика должна опираться на физико-математическое моделирование с учётом характеристик конкретной силовой установки, реального профиля маршрута и направления движения, а также возможности возврата гравитационной работы через рекуперацию. Сопоставимая логика учёта рельефа уже реализуется в современных алгоритмах управления энергопотоками транспортных средств, работающих в горной местности [22]. Модель, представленная в работе [4], вполне пригодна в качестве базовой формулировки для такой методики.

Полученные значения расхода допускают прямой экономический перевод в условиях Республики Таджикистан. Для приблизительной оценки на момент подготовки работы приняты характерные тарифы: стоимость бензина АИ-92, 10 сомони за литр (по данным розничной торговли Хатлонской и других областей 2025 года), стоимость электроэнергии для бытовых потребителей — 0,3536 сомони за 1 кВт·ч (базовый тариф ОАО «Барки Точик» для населения без учёта повышенных ступеней потребления).

При этих исходных данных стоимость проезда автомобиля-аналога по маршруту Куляб – Шохон составляет:

- для автомобиля с ДВС: $7,03 \text{ л} \times 10 \text{ сомони/л} = 70,3 \text{ сомони}$ в одном направлении;
- для электромобиля в направлении Куляб → Шохон: $9,09 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \times 0,3536 \text{ сомони/(кВт} \cdot \text{ч)} = 3,21 \text{ сомони}$;
- для электромобиля с усреднением по круговому рейсу: $7,51 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \times 0,3536 \text{ сомони/(кВт} \cdot \text{ч)} = 2,66 \text{ сомони}$.

Соотношение стоимости проезда в пользу электромобиля достигает от 21,9 раз в одну сторону до 26,4 раза при усреднении по круговому рейсу. Даже если фактическая стоимость электроэнергии для владельцев электромобилей окажется выше базового бытового тарифа (например, при зарядке на коммерческих станциях или с учётом повышенных ступеней), различие в удельных эксплуатационных затратах остаётся значительным.

Приведённые оценки следует рассматривать как ориентировочные и подлежащие уточнению применительно к конкретной ценовой ситуации. Тем не менее порядок различия наглядно демонстрирует потенциальную экономическую привлекательность электрифицированного транспорта именно в условиях горной эксплуатации там, где эффект рекуперативного торможения максимален. Оценки совокупной стоимости владения, выполненные для развитых рынков, показывают, что соотношение эксплуатационных затрат электромобиля и автомобиля с ДВС определяется прежде всего локальным соотношением цен на топливо и электроэнергию [17]. Для Республики Таджикистан к чисто экономическому эффекту добавляются ещё климатические и экологические соображения.

Отдельно стоит отметить важный практический момент. Применение методики дифференцированных норм [3] и физико-математического моделирования существенно различается не только по абсолютной величине оцениваемого расхода, но и по возможности учесть направление движения. Для операторов автотранспорта, которые эксплуатируют регулярные маршруты в обоих направлениях (например, пассажирские перевозки Куляб – Шохон), корректная оценка эксплуатационных затрат требует именно направленно-зависимой методики. Такая возможность есть у физико-математического моделирования и принципиально отсутствует у действующих норм.

5. Заключение (Conclusions)

Проведено количественное сопоставление двух подходов к оценке расхода энергии автомобильного транспорта на горном маршруте. С одной стороны, действующая в Республике Таджикистан методика дифференцированных норм расхода топлива для автомобилей с двигателями внутреннего сгорания. С другой, предложенная ранее одним из авторов физико-математическая модель энергопотребления электромобиля с системой рекуперативного торможения. В качестве объекта выбран реальный горный участок автомобильной дороги Куляб – Шохон в Хатлонской области.

Методика дифференцированных норм даёт близкие результаты в обеих формах: ступенчатой и непрерывной. Она оценивает повышенный расход в горных условиях на +9,8...10,5 % относительно базового значения и делает это одинаково в любом направлении движения.

Физико-математическая модель для электромобиля ведёт себя иначе. Она даёт существенно различающиеся значения по направлениям: +22,7 % при движении с чистым набором высоты и –20,0 % в обратную сторону. При усреднении по круговому рейсу превышение над базовым значением составляет всего +1,4 %.

Основное методологическое различие двух подходов лежит именно здесь. Модель способна учесть эффект рекуперативного торможения электрифицированного транспорта. Значительная часть энергии, затраченной на подъём, возвращается в батарею на последующем спуске. Действующие нормы такой возможности не имеют.

При принятых характерных тарифах на топливо и электроэнергию в Республике Таджикистан различие в стоимости проезда одного и того же маршрута для автомобиля с ДВС и электромобиля превышает 25-кратное соотношение в пользу последнего. Этот результат наглядно подчёркивает потенциальную экономическую эффективность электрифицированного транспорта именно в условиях горной эксплуатации.

Полученные данные указывают на необходимость разработки специализированной методики оценки эксплуатационных характеристик электрифицированного транспорта в горных условиях. Такая методика должна учитывать направление движения и характеристики системы рекуперации.

Рецензент: Давлатшоев Р.А. — к.т.н., доцент кафедры ЭАП, ТИПУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. СТ РТ 1087–2009. Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию. — Введ. 2010–01–01. — Душанбе : Таджикстандарт, 2009. — Текст : непосредственный.
2. СТ РТ 1088–2009. Автотранспортные средства. Периодический осмотр. Методы контроля. — Введ. 2010–01–01. — Душанбе : Таджикстандарт, 2009. — Текст : непосредственный.
3. Турсунов, А. А. Эффективность применения дифференцированных норм расхода топлива с учётом климатического зонирования территории Республики Таджикистан по условиям эксплуатации автомобильного транспорта / А. А. Турсунов, М. А. Абдуллоев, Ф. Джобиров, Ф. Мирзоахмедов // Проблемы функционирования систем транспорта. — 2012. — С. 365–371. — Текст : непосредственный. — DOI: 10.5281/zenodo.21603751.
4. Abdullo, M. A numerically stable cruise control model for an electric vehicle on a mountain route based on a smooth approximation of traction–regeneration mode switching / M. Abdullo // Furughi Ilm. Series: Natural and Mathematical Sciences. — 2026. — Т. 10, № 2. — С. 145–157. — Текст : непосредственный. — ISSN 3107-2348. — DOI: 10.24412/3078-395X-2026-2-10-145-457.
5. Ehsani, M. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design / M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, K. Ebrahimi. — Boca Raton : CRC Press, 2018. — 580 с. — Текст : непосредственный.
6. Ehsani, M. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design / M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay, A. Emadi. — 2004. — 1 с. — ISBN 978-0-429-12819-6. — Текст : непосредственный. — DOI: 10.1201/9781420037739.
7. Fiori, C. Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation / C. Fiori, K. Ahn, H. A. Rakha // Applied Energy. — 2016. — Т. 168. — С. 257–268. — Текст : непосредственный. — ISSN 0306-2619. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.097.
8. Guzzella, L. Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization / L. Guzzella, A. Sciarretta. — Berlin, Heidelberg : Springer, 2013. — 393 с. — ISBN 978-3-642-35912-5. — Текст : электронный. — DOI: 10.1007/978-3-642-35913-2.

9. ISO 2533:1975 Standard Atmosphere // ISO. – 1975. – Текст : электронный. URL: <https://www.iso.org/standard/7472.html> (дата обращения: 14.08.2026).
10. Micu, D. A. The Influence of Road Gradient Resistance on the Driving Range of Electric Vehicles / D. A. Micu, M. V. Bătaș, C. A. Rențea, A. A. Ancuța, R. Mancaș // Vehicles. – 2026. – Т. 8, № 3. – С. 44. – Текст : непосредственный. – ISSN 2624-8921. – DOI: 10.3390/vehicles8030044.
11. Onori, S. Hybrid Electric Vehicles: Energy Management Strategies / S. Onori, L. Serrao, G. Rizzoni. – London : Springer, 2016. – 113 с. – Текст : непосредственный. – DOI: 10.1007/978-1-4471-6781-5.
12. Plett, G. L. Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling / G. L. Plett. – Artech House, 2015. – 343 с. – ISBN 978-1-63081-024-5. – Текст : непосредственный.
13. Puma-Benavides, D. S. Low-Cost Instrumentation for Energy-Based Assessment of Electric Vehicles Under High-Altitude and High-Gradient Real-World Driving Conditions / D. S. Puma-Benavides, B. A. Cuaical-Angulo, A. S. Cevallos-Carvajal, G. M. Cruz-Arcos, E. A. Llanes-Cedeño, P. J. Guagalango-Gómez // World Electric Vehicle Journal. – 2026. – Т. 17, № 6. – С. 314. – Текст : непосредственный. – ISSN 2032-6653. – DOI: 10.3390/wevj17060314.
14. Rajamani, R. Vehicle Dynamics and Control / R. Rajamani. – Boston, MA : Springer US, 2012. – 498 с. – ISBN 978-1-4614-1432-2. – Текст : электронный. – DOI: 10.1007/978-1-4614-1433-9.
15. Szumska, E. M. Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review of Design, Control Strategies, and Efficiency Challenges / E. M. Szumska // Energies. – 2025. – Т. 18, № 10. – С. 2422. – Текст : непосредственный. – ISSN 1996-1073. – DOI: 10.3390/en18102422.
16. Szumska, E. M. The Analysis of Energy Recovered during the Braking of an Electric Vehicle in Different Driving Conditions / E. M. Szumska, R. Jurecki // Energies. – 2022. – Т. 15, № 24. – С. 9369. – Текст : непосредственный. – ISSN 1996-1073. – DOI: 10.3390/en15249369.
17. Woody, M. Electric and gasoline vehicle total cost of ownership across US cities / M. Woody, S. A. Adderly, R. Bohra, G. A. Keoleian // Journal of Industrial Ecology. – 2024. – Т. 28, № 2. – С. 194–215. – Текст : непосредственный. – ISSN 1530-9290. – DOI: 10.1111/jiec.13463.
18. Baglione, M. Vehicle System Energy Analysis Methodology and Tool for Determining Vehicle Subsystem Energy Supply and Demand / M. Baglione, M. Duty, G. Pannone. – SAE International, 2007. – Текст : электронный. – DOI: 10.4271/2007-01-0398.
19. ГОСТ 2939-63 Газы. Условия для определения объема. – 1964. – Текст : электронный.
20. Bermúdez, V. Influence of Environmental Changes Due to Altitude on Performance, Fuel Consumption and Emissions of a Naturally Aspirated Diesel Engine / V. Bermúdez, J. R. Serrano, P. Piqueras, O. García-Afonso // Energies. – 2021. – Т. 14, № 17. – С. 5346. – Текст : непосредственный. – ISSN 1996-1073. – DOI: 10.3390/en14175346.
21. Liu, K. Impact of road gradient on energy consumption of electric vehicles / K. Liu, T. Yamamoto, T. Morikawa // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2017. – Т. 54. – С. 74–81. – Текст : непосредственный. – ISSN 1361-9209. – DOI: 10.1016/j.trd.2017.05.005.
22. Tang, T. Energy management of fuel cell hybrid electric bus in mountainous regions: A deep reinforcement learning approach considering terrain characteristics / T. Tang, Q. Peng, Q. Shi, Q. Peng, J. Zhao, C. Chen, G. Wang // Energy. – 2024. – Т. 311. – С. 133313. – Текст : непосредственный. – ISSN 0360-5442. – DOI: 10.1016/j.energy.2024.133313.
23. Wu, X. Energy-Optimal Speed Control for Electric Vehicles on Signalized Arterials / X. Wu, X. He, G. Yu, A. Harmandayan, Y. Wang // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2015. – Т. 16, № 5. – С. 2786–2796. – Текст : непосредственный. – ISSN 1558-0016. – DOI: 10.1109/TITS.2015.2422778.

References

1. Agency for Standardization, Metrology, Certification and Trade Inspection under the Government of the Republic of Tajikistan (Tajikstandard). (2009). *ST RT 1087–2009. Avtotransportnyye sredstva. Trebovaniya bezopasnosti k tekhnicheskomu sostoyaniyu* [State Standard of the Republic of Tajikistan 1087–2009. Motor vehicles. Safety requirements for technical condition].
2. Agency for Standardization, Metrology, Certification and Trade Inspection under the Government of the Republic of Tajikistan (Tajikstandard). (2009). *ST RT 1088–2009. Avtotransportnyye sredstva. Periodicheskiy osmotr. Metody kontrolya* [State Standard of the Republic of Tajikistan 1088–2009. Motor vehicles. Periodic inspection. Control methods].
3. Tursunov, A. A., Abdulloyev, M. A., Jobirov, F., & Mirzoakhmedov, F. (2012). Effektivnost' primeneniya differentsirovannykh norm rashkoda topliva s uchotom klimaticheskogo zonirovaniya territorii Respubliki Tadzhikistan po usloviyam ekspluatatsii avtomobil'nogo transporta [Efficiency of applying differentiated fuel consumption rates taking into account the climate zoning of the territory of the Republic of Tajikistan according to motor transport operating conditions]. *Problemy funktsionirovaniya sistem transporta* [Problems of Transport System Functioning], 365–371. <https://doi.org/10.5281/zenodo.21603751>
4. Abdullo, M. (2026). A numerically stable cruise control model for an electric vehicle on a mountain route based on a smooth approximation of traction–regeneration mode switching. *Furughi Ilm. Series: Natural and Mathematical Sciences*, 10(2), 145–157. <https://doi.org/10.24412/3078-395X-2026-2-10-145-457>

5. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: Fundamentals, theory, and design* (3rd ed.). CRC Press.
6. Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S., & Emadi, A. (2004). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: Fundamentals, theory, and design*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420037739>
7. Fiori, C., Ahn, K., & Rakha, H. A. (2016). Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation. *Applied Energy*, 168, 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.097>
8. Guzzella, L., & Sciarretta, A. (2013). *Vehicle propulsion systems: Introduction to modeling and optimization* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35913-2>
9. International Organization for Standardization. (1975). *Standard atmosphere* (ISO Standard No. 2533:1975). <https://www.iso.org/standard/7472.html>
10. Micu, D. A., Bătașu, M. V., Reștea, C. A., Ancuța, A. A., & Mancaș, R. (2026). The influence of road gradient resistance on the driving range of electric vehicles. *Vehicles*, 8(3), 44. <https://doi.org/10.3390/vehicles8030044>
11. Onori, S., Serrao, L., & Rizzoni, G. (2016). *Hybrid electric vehicles: Energy management strategies*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6781-5>
12. Plett, G. L. (2015). *Battery management systems, volume I: Battery modeling*. Artech House.
13. Puma-Benavides, D. S., Cuaical-Angulo, B. A., Cevallos-Carvajal, A. S., Cruz-Arcos, G. M., Llanes-Cedeño, E. A., & Guagalango-Gómez, P. J. (2026). Low-cost instrumentation for energy-based assessment of electric vehicles under high-altitude and high-gradient real-world driving conditions. *World Electric Vehicle Journal*, 17(6), 314. <https://doi.org/10.3390/wevj17060314>
14. Rajamani, R. (2012). *Vehicle dynamics and control* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1433-9>
15. Szumska, E. M. (2025). Regenerative braking systems in electric vehicles: A comprehensive review of design, control strategies, and efficiency challenges. *Energies*, 18(10), 2422. <https://doi.org/10.3390/en18102422>
16. Szumska, E. M., & Jurecki, R. (2022). The analysis of energy recovered during the braking of an electric vehicle in different driving conditions. *Energies*, 15(24), 9369. <https://doi.org/10.3390/en15249369>
17. Woody, M., Adderly, S. A., Bohra, R., & Keoleian, G. A. (2024). Electric and gasoline vehicle total cost of ownership across US cities. *Journal of Industrial Ecology*, 28(2), 194–215. <https://doi.org/10.1111/jiec.13463>
18. Baglione, M., Duty, M., & Pannone, G. (2007). *Vehicle system energy analysis methodology and tool for determining vehicle subsystem energy supply and demand* (SAE Technical Paper No. 2007-01-0398). SAE International. <https://doi.org/10.4271/2007-01-0398>
19. Euro-Asian Council for Standardization, Metrology and Certification. (1964). *GOST 2939-63 Gazy. Usloviya dlya opredeleniya ob'yema* [Interstate Standard GOST 2939-63 Gases. Conditions for determining volume].
20. Bermúdez, V., Serrano, J. R., Piqueras, P., & García-Afonso, O. (2021). Influence of environmental changes due to altitude on performance, fuel consumption and emissions of a naturally aspirated diesel engine. *Energies*, 14(17), 5346. <https://doi.org/10.3390/en14175346>
21. Liu, K., Yamamoto, T., & Morikawa, T. (2017). Impact of road gradient on energy consumption of electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.05.005>
22. Tang, T., Peng, Q., Shi, Q., Peng, Q., Zhao, J., Chen, C., & Wang, G. (2024). Energy management of fuel cell hybrid electric bus in mountainous regions: A deep reinforcement learning approach considering terrain characteristics. *Energy*, 311, 133313. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133313>
23. Wu, X., He, X., Yu, G., Harmandayan, A., & Wang, Y. (2015). Energy-optimal speed control for electric vehicles on signalized arterials. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(5), 2786–2796. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2422778>

Сведения об авторах:

Абдулло Мамадамон Абдурахмонбек, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» Таджикского технического университета по им. акад. М.С. Осими. <https://farzonagon.tj/tg/profile/2108-4205>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6253-5946>. E-mail: mamadamonabdullo@gmail.com.

Саъдуллозода Шахриёр Саъдулло, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Естественно-математических наук Университета инноваций и цифровых технологий Таджикистана, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5801-9140>. E-mail: srsaidaliev@gmail.com

Сайфиддинзода Одил, PhD, ассистент кафедры «Релейная защита и автоматизация энергетических систем» Таджикского технического университета по им. акад. М.С. Осими. ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-0894-4319>. E-mail: odil0210@gmail.com

Маълумот оид ба муаллифон:

Абдулло Мамадамон Абдурахмонбек, номзади илмҳои техникӣ, дотсенти кафедраи истифодабарии нақлиёти автомобилӣ, Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ. <https://farzonagon.tj/tg/profile/2108-4205>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6253-5946>. E-mail: mamadamonabdullo@gmail.com.

Саъдуллозода Шахриёр Саъдулло, номзади илмҳои техникӣ, дотсент, дотсенти кафедраи илмҳои табиӣ ва математикаи Донишгоҳи инноватсия ва технологияҳои рақамии Тоҷикистон, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5801-9140>. E-mail: srsaidaliev@gmail.com

Сайфиддинзода Одил, PhD, ассистенти кафедраи “Ҳимояи релей ва автоматикаи системаҳои энергетикӣ” Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ. ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-0894-4319>. E-mail: odil0210@gmail.com

Information about the authors:

Abdullo Mamadamon Abdurahmonbek, candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Operation of road transport» Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi. <https://farzonagon.tj/tg/profile/2108-4205>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6253-5946>. E-mail: mamadamonabdullo@gmail.com.

Sadullozoda Shahriyor Sadullo, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Natural and Mathematical Sciences of the University of Innovations and Digital Technologies of Tajikistan, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5801-9140>. E-mail: srsaidaliev@gmail.com

Sayfiddinzoda Odil, PhD, assistant at the Department of Relay protection and automation of power systems Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi. ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-0894-4319>. E-mail: odil0210@gmail.com