
УДК 338.47,338.45.01

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА В РОССИИ

© 2022 г. А. И. Соляник¹, *, Ф. В. Веселов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт энергетических исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: andsolyanik@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.07.2022 г.

После доработки 12.08.2022 г.

Принята к публикации 15.08.2022 г.

В статье представлены результаты анализа конкурентоспособности разных видов автомобильного транспорта в России, использующих различные энергоносители, по критерию приведенной стоимости владения автотранспортным средством за его жизненный цикл. На базе этого показателя выполнено экономическое сопоставление традиционных легковых автомобилей и автобусов на органическом топливе с их электрифицированными альтернативами. Сценарные расчеты, выполненные при разных допущениях о темпах снижения стоимости электромобилей, демонстрируют ограниченность условий, при которых достигается их равноэффективность с традиционными видами автотранспорта, использующими моторное нефтетопливо или газомоторное топливо. В работе также количественно оценивается потенциальный объем затрат, необходимых для создания зарядной инфраструктуры для электротранспорта.

Ключевые слова: автотранспорт, электротранспорт, электромобили, экономическая эффективность, приведенная стоимость владения, зарядная инфраструктура

DOI: 10.31857/S0002331022060036

ВВЕДЕНИЕ

К началу XXI века в мире существенно обострилась ситуация с антропогенными выбросами парниковых газов. При этом, согласно данным Международного энергетического агентства (МЭА), транспортный сектор является вторым по объему эмитентом парниковых газов после топливно-энергетического сектора с долей выбросов порядка 23% от суммарных по миру [1]. В этой связи неудивительным становится растущий интерес к декарбонизации (снижению уровня выбросов парниковых газов) транспортного сектора. В качестве ключевого инструмента снижения выбросов в транспортном секторе обычно рассматривается электрификация. Стратегии развития электротранспорта уже приняты в Китае, Евросоюзе и ряде его стран-членов, США, Австралии. В 2021 году концепция развития электротранспорта была утверждена и в России [2]. Данный документ предусматривает выход на уровень производства электромобилей в 217 тыс. штук в год к 2030 г.; кроме того, для обслуживания парка электромобилей к 2030 г. планируется создание около 14 тыс. единиц зарядных устройств.

В последние 5–7 лет в мире отмечается устойчивый рост производства и продаж электромобилей (включая гибридные автомобили). По данным аналитического агентства Pew Research [3] совокупный мировой объем продаж таких автомобилей в 2020 году составил около 3 млн единиц (в 2014 г. – всего 350 тыс.). При этом в Евросоюзе

электромобили составляют уже свыше 10% годовых продаж, в Китае – около 6% [3]. Согласно последним прогнозам МЭА, к 2050 году ожидается рост мирового парка электромобилей до 1–1.5 млрд единиц в зависимости от сценария развития мировой энергетики [4]. По расчетам МЭА достижение верхней планки этого диапазона (1.5 млрд штук) позволит снизить выбросы CO_2 в дорожно-транспортном секторе на 2/3 относительно отчетного уровня.

В настоящее время электромобили уступают традиционным автомобилям как с точки зрения стоимости покупки, так и с точки зрения совокупных затрат потребителя, связанных с их покупкой и эксплуатацией на всем сроке владения. Именно поэтому на первоначальной стадии своего развития электротранспорт пользуется достаточно сильными механизмами государственной поддержки – субсидиями, налоговыми льготами. Однако, по авторитетным международным оценкам [4, 5], в перспективе стоимость электромобилей будет устойчиво снижаться во многом благодаря масштабированию производства аккумуляторов для таких машин, что уменьшит удельные производственные затраты в расчете на один такой аккумулятор. Однако, при оценках эффективности развития электромобилей с точки зрения общества (народного хозяйства) в целом, следует учитывать и объем затрат на развитие зарядной инфраструктуры для электромобильного парка. Эти затраты могут достигать сопоставимых значений с затратами собственно на создание и содержание самого электромобильного парка [6, 7].

В этой связи актуальным является исследование экономической эффективности развития электротранспорта в России. В работе оцениваются совокупные приведенные (дисконтированные) затраты на создание и эксплуатацию электромобилей в легковом и крупном пассажирском (автобусы) секторе. Кроме того, анализируется и влияние необходимых инфраструктурных затрат (электрозарядные станции) на конкурентоспособность электрифицированного транспорта. Исследование может быть полезно для предварительной оценки технологических приоритетов и обоснования масштабов необходимой экономической поддержки программ и проектов развития электротранспорта на национальном, региональном и муниципальном уровнях.

1. МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

В мировой практике сравнение экономической эффективности разных видов транспорта, как правило, выполняется на основе показателя полной приведенной стоимости владения автотранспортным средством за его жизненный цикл (англ. – *total cost of ownership, TCO*). Эта методическая концепция активно используется как минимум с начала 1990-х гг. и достаточно широко применяется в западной практике для сопоставления между собой широкого спектра потребительских товаров длительного пользования, в т.ч. и автомобилей [8].

В наиболее общем виде показатель *TCO* автотранспортного средства включает в себя три крупные составляющие, дисконтированные за весь жизненный цикл его использования:

$$TCO = CAPEX + \sum_{t=0}^{T-1} OPEX_t(1+d)^{-t} + \sum_{t=0}^{T-1} EC_t(1+d)^{-t}, \quad (1)$$

где *CAPEX* (*capital expenses*) – капитальные затраты приобретателя (стоимость покупки автотранспортного средства); *OPEX* (*operational expenses*) – условно-постоянные затраты, связанные с эксплуатацией автотранспортного средства (включая затраты на техобслуживание и ремонт); *EC* (*energy cost*) – затраты, связанные с закупками энергоносителя, потребляемого автотранспортным средством (переменные эксплуатационные затраты); *d* – ставка дисконтирования; *T* – рассматриваемый срок эксплуатации автотранспортного средства.

Нередко в аналитических работах используется производный от TCO показатель – стоимость владения в расчете на единицу автопробега (*levelized cost of driving, LCOD*):

$$LCOD = \frac{TCO}{\sum_{t=0}^{T-1} M(1+d)^{-t}}, \quad (2)$$

где M (*mileage*) – суммарный пробег за жизненный цикл автотранспортного средства (этот показатель может быть получен, например, из открытых данных национальной статистики или из консалтинговых исследований).

Кроме того, в литературе часто используется и модифицированный вариант формулы TCO, приводящий затраты к среднегодовому выражению (*annualized total cost of ownership, ATCO*):

$$ATCO = CAPEX \cdot A + OPEX + EC, \quad (3)$$

где A – коэффициент аннуитета, характеризующий ежегодную долю возврата инвестиций с учетом выбранных ставки дисконтирования и срока службы автомашины. Значение аннуитета A вычисляется таким образом, чтобы продисконтированная на весь срок службы автомобиля величина его CAPEX возвращалась ежегодно равными долями.

Следует особо отметить, что формула 3 тождественна формуле 1 только при условии одинаковых значений OPEX, EC и ставки дисконта по годам срока службы.

Все три вышеприведенных показателя (TCO, ATCO, LCOD) являются взаимосвязанными между собой и дают одинаковое ранжирование рассматриваемых технологий автотранспорта; меняется лишь единица измерения результатов.

Описанная выше методика расчета показателя TCO как суммы дисконтированных капитальных и эксплуатационных затрат является довольно универсальной, однако, в зависимости от целей анализа, в разных работах может проявляться своя специфика. Основные методические “развилки” включают:

1. Выбор срока эксплуатации автотранспортного средства

В проанализированной литературе встречаются разные значения этого показателя – от 3 до 15 лет. В силу этого будет существенно варьироваться структура TCO и его абсолютная величина. При малом горизонте анализа в структуре TCO будут доминировать капитальные затраты, однако по мере удлинения горизонта анализа все больший удельный вес будут получать эксплуатационные затраты. Эта зависимость наглядно показана на рис. 1.

В работе [9] показано, что выбор тех или иных сроков эксплуатации автотранспорта зависит в основном от целей анализа. Для оценки коммерческой эффективности авторы зачастую используют достаточно короткий горизонт анализа, близкий к сроку эксплуатации автомобиля его первым владельцем, покупающим его на первичном рынке и впоследствии перепродающим на вторичном (в этом случае в разных работах авторы используют срок эксплуатации от 3 до 7 лет). Для оценки общественной эффективности чаще всего используют полный срок службы автотранспорта (10–15 лет), что позволяет корректно оценить суммарные приведенные затраты за весь жизненный цикл независимо от числа владельцев данного автотранспортного средства [10].

2. Учет/неучет остаточной стоимости автотранспортного средства в конце срока эксплуатации

Этот параметр также определяется в зависимости от целей анализа. При оценке коммерческой эффективности остаточную стоимость автомобиля обычно учитывают. Тем самым показатель TCO снижается на эту величину (с поправкой на коэффициент

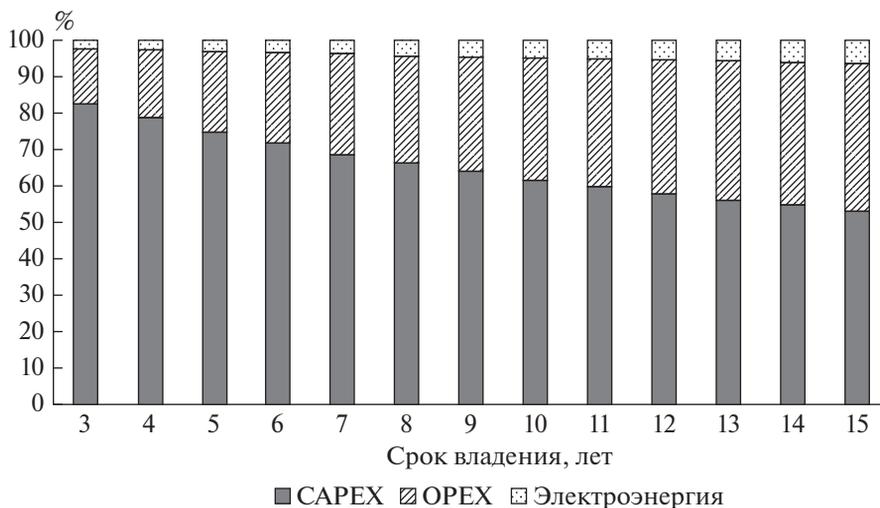


Рис. 1. Изменение структуры ТСО в зависимости от срока его эксплуатации.

дисконтирования в конце прогнозного периода). Такой подход отражен в формуле 4. При оценке общественной эффективности остаточная стоимость не учитывается, поскольку горизонт анализа принимается близким к среднестатистическому жизненному циклу рассматриваемой категории автотранспорта.

$$TCO = CAPEX + \sum_{t=0}^{T-1} OPEX_t(1+d)^{-t} + \sum_{t=0}^{T-1} EC_t(1+d)^{-t} - RET(1+d)^{-T}, \quad (4)$$

где RET – остаточная стоимость автомобиля в конце срока службы T .

3. Учет графика амортизации автотранспортного средства

В работах, направленных на анализ коммерческой эффективности владения автотранспортом, капитальная составляющая (CAPEX) обычно транслируется в ежегодную амортизацию, вычисляемую в процентах от остаточной стоимости авто. В силу снижения остаточной стоимости годовая амортизация также будет снижаться от максимального значения в первый год эксплуатации до минимального уровня к концу срока эксплуатации. В ряде работ используется сокращенный амортизационный период, по окончании которого амортизация перестает включаться в состав ТСО.

В работах, направленных на анализ общественной эффективности, амортизация не рассчитывается, а CAPEX включается в расчет ТСО целиком в первый год эксплуатации, как показано в формуле 1.

4. Степень детализации условно-постоянных эксплуатационных затрат (OPEX)

При анализе коммерческой эффективности OPEX рассчитывается достаточно детально, с выделением составляющих регулярного техобслуживания (maintenance), вынужденных ремонтов (repair), страхования (insurance), а также налогов и сборов (taxes and fees). Оценка общественной эффективности допускает использование укрупненного подхода, где OPEX рассчитывается в процентном отношении от капитальных затрат или на единицу пробега автомашины. При этом расчеты общественной эффективности требуют исключения из периметра анализа трансфертных платежей (в данном случае –

налогов, сборов и страховых платежей) между отдельными экономическими агентами, не влияющих на интегральную величину затрат и выгод для экономики в целом.

5. Учет экстернатальных затрат

При оценке общественной эффективности необходимо отдельно учитывать затраты, связанные с созданием и обслуживанием инфраструктуры для инновационных видов транспорта (электростанций для электромобилей и гибридов, водородных заправок для транспорта на основе топливных элементов). При этом формула 1 трансформируется в более сложное выражение:

$$TCO = CAPEX^A + \frac{\sum_{t=0}^{T-1} OPEX_t^A}{(1+d)^t} + \frac{\sum_{t=0}^{T-1} EC_t^A}{(1+d)^t} + CAPEX^I + \frac{\sum_{t=0}^{T-1} OPEX_t^I}{(1+d)^t}, \quad (5)$$

где A – индекс показателей автотранспорта; I – индекс показателей зарядной инфраструктуры.

2. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОДОРОЖНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА В СРАВНЕНИИ С ТРАДИЦИОННЫМИ АЛЬТЕРНАТИВАМИ

В данной работе оценки конкурентоспособности электромобилей выполнены с точки зрения общественной (народнохозяйственной) эффективности. При этом рассматриваются как затраты, непосредственно связанные с автомобилем, так и сопутствующие затраты, связанные с созданием зарядной инфраструктуры.

При сравнительном анализе эффективности разных видов автотранспорта определяющее значение играет корректность выбора технико-экономических показателей, используемых для расчета показателей ТСО. Учитывая высокую неопределенность данных по капитальной и эксплуатационной составляющим затрат (CAPEX и OPEX) автомобилей, различие (до десятков процентов) количественных показателей среди рассмотренных источников информации, наиболее целесообразным решением является использовать в качестве аналога CAPEX отпускные цены наиболее продаваемых на российском рынке автомобилей соответствующего типа двигателя (бензиновый ДВС, газомоторный транспорт, электродвигатель), а в качестве аналога OPEX – ориентировочные цены регулярного техобслуживания и ремонта автомобиля. Для условий России наиболее продаваемой моделью традиционной легковой автомашины является Kia Rio [11], а в качестве бенчмарка электромобиля выбрана самая продаваемая из бюджетных моделей – Nissan Leaf (статистически, наибольший объем текущих продаж в РФ приходится на авто премиум-класса – Tesla, Porsche – однако в силу высокой стоимости эти модели не смогут быть массово востребованы в России).

Помимо автомобилей с ДВС на бензине в работе рассматривается их модификация с переводом на использование газомоторного топлива (ГМТ) – сжиженной пропан-бутановой смеси (ПБ). Их включение в периметр анализа обоснованно ввиду характерных для России низких цен газа (с поправкой на его теплотворную способность) в сравнении с бензином и дизелем. При этом стоимость этих автомобилей принимается на 5% выше классических бензиновых, а расход топлива – на 10% выше.

Для пассажирского транспорта (автобусов) исходные показатели для расчетов ТСО принимаются на основе данных источника [12], также адаптированных к российским условиям.

Принятые для расчетов экономической эффективности данные по легковым автомобилям и пассажирскому транспорту сведены в табл. 1.

Расчеты топливных затрат легковых автомобилей выполнены при ценах электроэнергии, бензина и ГМТ, соответствующих отчетному уровню 2021 г. (использовались

Таблица 1. Исходные показатели для сравнения ТСО разных видов транспорта (в ценах 2020 г.)

Легковые автомобили		Бензин	Газомоторное топливо	Электромобиль
Жизненный цикл	лет	15	15	15
CAPEX	тыс. руб.	1200	1260	2300
OPEX (в среднем за год)	тыс. руб./год	70	70	130
Расход энергоносителя		6.6 л/100 км	7.3 л/100 км	19.0 кВт ч/100 км
Автобусы		Дизель	Газомоторное топливо	Электробус
Жизненный цикл	лет	12	12	12
CAPEX	тыс. руб.	13100	18600	36800
OPEX (за жизненный цикл)	тыс. руб.	15540	17900	30620
Топливные затраты (за жизненный цикл)	тыс. руб.	21780	12110	10710

данные Росстата). Прогноз цен энергоносителей на 2030 г. выполнен с допущением о росте в пределах инфляции, т.е. нулевом изменении в реальном выражении.

При прогнозе CAPEX и OPEX электромобилей на 2030 г. учтено удешевление стоимости их аккумуляторов по оценкам IEA и Bloomberg [4, 5]. Доля аккумуляторов в цене автомобилей принята по агрегированным данным, представленным в докладе Аргоннской национальной лаборатории США [10]. По этим оценкам в 2021 г. эта доля составляет около 40% совокупной стоимости электрического автотранспортного средства. По мере удешевления аккумуляторов эта доля к 2030 г. может снизиться до 25%. В результате CAPEX электромобилей снизится примерно на 25% – до 1775 тыс. руб. (в ценах 2020 г.). Кроме этого, пропорционально снижению CAPEX уменьшатся и условно-постоянные затраты (OPEX).

Однако еще одним фактором неопределенности являются темпы локализации производства электромобилей на территории России. Фактор ускоренной локализации производства позитивно влияет на CAPEX и OPEX электромобилей ввиду более низкой стоимости труда и материалов на отечественном рынке, а также за счет снижения логистических затрат. В работе рассматриваются два варианта, принципиально различающиеся по темпам локализации электромобилей. В варианте 1 предполагается отсутствие локализации, т.е. ключевым фактором снижения CAPEX в этом варианте является удешевление аккумуляторов, рассмотренное выше. В варианте 2 предполагается глубокая локализация производства электромобилей, со снижением CAPEX на 50% относительно уровня 2021 г.

Прогноз показателей CAPEX и OPEX электромобилей для вариантов без/с локализацией представлен в табл. 2.

Помимо перечисленных выше трех составляющих затрат существенное влияние на величину ТСО оказывает ставка дисконтирования, определяющая стоимость капитала, привлекаемого для покупки транспортного средства. Расчеты выполнены при ставке дисконтирования 8% (в реальном выражении, т.е. без учета инфляционной составляющей). Однако дополнительно оценены и пороговые значения ставки дисконтирования, необходимые для ценовой конкурентоспособности электромобилей в российских условиях.

Ниже, на рисунках 2–3 представлены результаты расчетов среднегодовой ТСО (АТСО) легковых автомобилей и автобусов. Расчеты выполнены для двух точек – 2021 и 2030 гг. При этом отображение показателя ТСО в среднегодовом виде означает, что капиталовложения на приобретение автомобиля “распределяются” на весь срок службы автомобиля (в соответствии с допущениями из табл. 1) с учетом аннуитетного фактора, зависящего от выбранной ставки дисконтирования и срока службы автомобиля. С экономической точки зрения, аннуитетный фактор определяет ежегодную величину

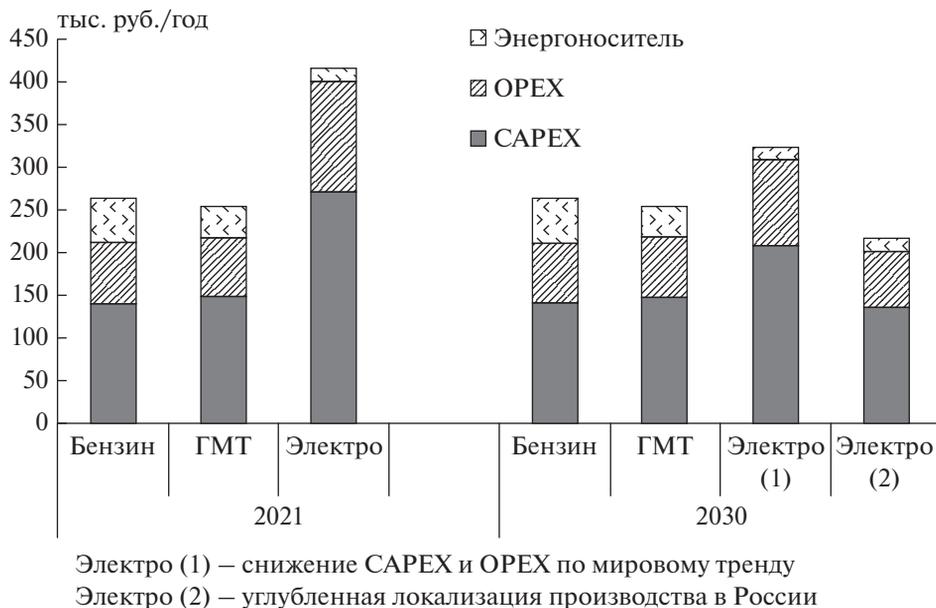


Рис. 2. Сравнение показателей АТСО для легковых автомобилей в условиях России, тыс. руб. в год (в ценах 2021 г., ставка дисконтирования 8%).

возврата первоначальных капиталовложений с учетом их требуемой доходности (задаваемой через ставку дисконтирования).

Как видно, при ставке дисконтирования 8% в 2021 году электромобили серьезно уступают по стоимости владения не только традиционным автомобилям на бензине, но и на ГМТ (рис. 2). Основной причиной является почти двухкратная разница в стоимости (CAPEX) традиционных машин и электромобили. К 2030 г. снижение стоимости аккумуляторов позволит заметно повысить конкурентоспособность электромобилей. При росте цены электроэнергии не выше инфляции в варианте 1 (без локализации) их АТСО будет лишь на 25% выше, чем у традиционных автомобилей, а в варианте 2 (с локализацией) – на 16% ниже, чем АТСО бензинового авто и на 14% ниже, чем АТСО авто на газомоторном топливе. В варианте 2 CAPEX и OPEX электромобили будут сопоставимы с традиционными типами авто, однако переменные расходы (на энергоноситель) будут ниже в силу гораздо более высокого (до 95%) КПД электромобили.

В ходе анализа были также определены пороговые значения факторов, при которых электромобили становятся равноэффективными (равными по величине АТСО) с тра-

Таблица 2. Прогноз CAPEX и OPEX электромобилей в 2030 г. (в ценах 2020 г.)

		Вариант 1 (без локализации)	Вариант 2 (с локализацией)
Легковые автомобили			
CAPEX	тыс. руб.	1775	1150
OPEX (годовой)	тыс. руб./год	100	65
Автобус			
CAPEX	тыс. руб.	28312	18400
OPEX (за весь жизненный цикл)	тыс. руб.	23557	15310

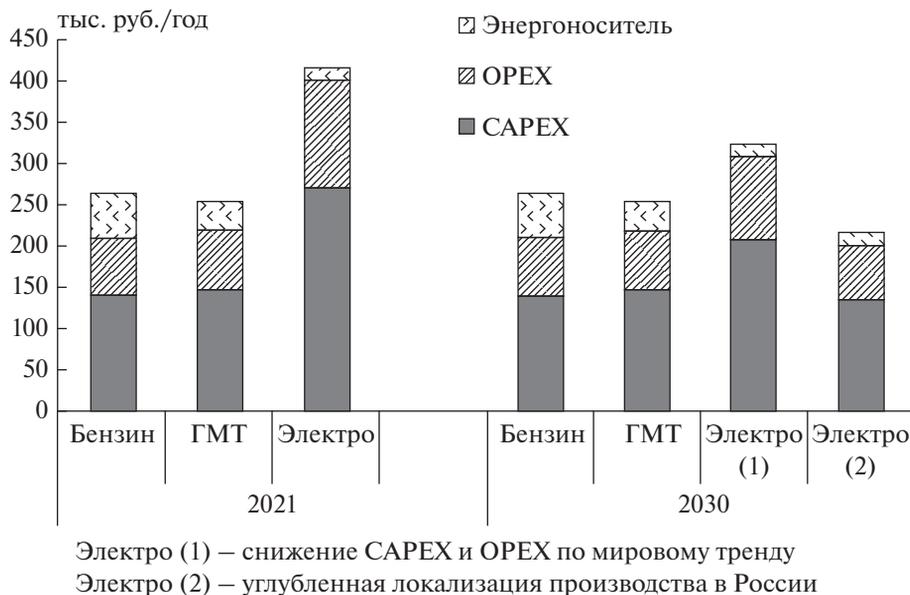


Рис. 3. Сравнение показателей АТСО для автобусов в условиях России, тыс. руб. в год (в ценах 2021 г., ставка дисконтирования 8%).

традиционными автомобилями на бензине. Наши расчеты показывают, что для достижения такого “экономического паритета” к 2030 г. потребуется снижение CAPEX и OPEX электромобиля на 40% от их уровней в 2021 г. Эта величина может рассматриваться как минимальный целевой ориентир для мероприятий по локализации электромобилей в стране. Другим вариантом достижения равноэффективности электромобилей с традиционными может стать субсидирование процентных ставок, учитываемое через ставку дисконтирования. Расчеты показали, что для условий 2030 г. ставка дисконта для электромобилей должна быть снижена до 2.5%.

Похожая картина прослеживается и в отношении разных видов крупного пассажирского автотранспорта (рис. 3). Стоимость владения автобусом на дизеле и ГМТ практически совпадает (второй вариант примерно на 3% дешевле), в то время как АТСО электробуса в 2021 году в полтора раза выше. К 2030 г. конкурентоспособность электробусов заметно улучшится – в варианте без локализации их АТСО всего на 25% выше дизельного автобуса, а при условии локализации – на 12% ниже. Равноэффективность электробусов с традиционными видами автобусного парка достигается при снижении CAPEX и OPEX на 43% относительно уровня 2021 г., либо при ставке дисконтирования 2.5%. Таким образом, пороговые условия достижения конкурентоспособности электробусов и легковых электромобилей (в части необходимой величины их капитальных и эксплуатационных затрат, а также стоимости капитала) практически совпадают.

В целом выполненные расчеты показывают теоретическую возможность выхода электротранспорта на конкурентоспособность с традиционными видами транспорта – как в легковом, так и крупном пассажирском секторе перевозок. Однако для этого потребуются сочетание сразу двух позитивных тенденций – во-первых, продолжение тренда по снижению стоимости аккумуляторных батарей (эффект масштабирования их производства на общемировом и особенно – на российском уровнях), во-вторых, углубленная локализация производства электромобилей в России (что позволит снизить их себестоимость за счет использования местных трудовых и сырьевых ресурсов, а также

снижения логистических затрат). Дополнительным важным фактором будет и экономическая поддержка, обеспечивающая более низкую стоимость капитала для электротранспорта по сравнению с традиционным.

3. Оценка влияния инфраструктурных затрат на конкурентоспособность электротранспорта

Представленные выше расчеты АТСО не учитывают стоимость зарядной инфраструктуры для электромобилей. Между тем этот фактор существенно повышает стоимость владения электромобилем и является принципиально важным для оценки общественной (народнохозяйственной) эффективности разных видов электротранспорта. Именно поэтому в данной работе был выполнен дополнительный расчет показателей АТСО – с укрупненным учетом инфраструктурных затрат через коэффициент соотношения числа автомобилей к числу зарядных станций.

В ходе расчетов были учтены принципиальные различия разных технических устройств для заряда электромобилей. Использовалась классификация, утвержденная Ассоциацией автомобильных инженеров (SAE) [13], которая выделяет три уровня зарядных устройств:

– Зарядные устройства уровня 1 (Level 1) – простейший тип зарядных устройств, работающий от бытовой сети. Эти приборы обеспечивают медленную зарядку автомобиля в течение 7–8 часов и используются обычно в домашних условиях.

– Зарядные станции уровня 2 (Level 2) используют 240-вольтовое соединение для питания электромобиля. Длительность полного заряда достигает 2–3 часов.

– Зарядные устройства уровня 3 (Level 3 или fast chargers) известны как быстрые зарядные устройства постоянного тока с входным напряжением 400 В или выше. Такие устройства могут заряжать до 80% аккумулятора электромобиля всего за 20–30 минут. Именно их обычно используют на общественных зарядных станциях.

В табл. 3 представлены стоимостные показатели различных типов зарядных устройств (по данным [14]). Как видно, затраты на самые простейшие (домашние) зарядные устройства уровня 1 составляют примерно 300 долл., в то время как общественные зарядные устройства даже на уровне 2 требуют около 6000 долл. за единицу, с учетом затрат на монтаж оборудования и присоединение к сетям.

С учетом оценок единичной стоимости устройств и прогнозируемых масштабов внедрения электротранспорта в России была выполнена оценка совокупных затрат на строительство необходимой зарядной инфраструктуры в перспективе до 2050 г.

При этом прогноз величины прироста электропотребления выполнен следующим образом:

1) Объемы ежегодного выпуска электромобилей на перспективу до 2030 г. приняты в соответствии с целевыми показателями Стратегии развития электротранспорта в Российской Федерации [2]. На период 2030–2050 гг. темпы прироста электромобилей экстраполируются с постепенным затуханием темпов прироста (что отражает постепенное исчерпание “эффекта низкой базы”). В целом при принятых допущениях годовой объем продаж электромобилей к 2050 г. достигнет 1.32 млн штук в год.

2) С учетом прогнозной динамики производства новых и выбытия отработавших свой ресурс электромобилей (с учетом их ожидаемого срока службы из табл. 1) оценивается действующий автопарк на каждом временном отрезке прогнозного периода. По нашим оценкам, к 2050 г. парк электромобилей составит 13.2 млн машин.

3) Поскольку в Стратегии развития электротранспорта в Российской Федерации нет четкой детализации производства электромобилей по классам (легковые, грузовые, крупные и средние пассажирские), такое деление в работе было выполнено экспертным путем. Учитывая, что основные государственные усилия в настоящее время прикладываются к переводу на электропривод городского пассажирского транспорта (автобусов), нами предполагается поэтапная замена к 2050 г. 75% действующего авто-

Таблица 3. Капитальные вложения в зарядную инфраструктуру по типам устройств, долл./шт.

Тип устройства	Оборудование	Монтаж и подключение к сетям	ИТОГО
Level 1	300	0	300
Level 2 (домашние)	550	1286	1836
Level 2 (общественные)	3500	2500	6000
Level 3 (50 кВт)	38000	20000	58000
Level 3 (150 кВт)	90000	60000	150000

бусного парка (до 300 тысяч из примерно 400 тысяч штук работающих на 2020 г. [15]) на электробусы. Остальные 12.9 млн электромобилей предполагаются легковыми.

4) Данные по среднему годовому пробегу и удельному расходу электроэнергии на 100 км пробега для легковых электрокаров и электробусов приняты в соответствии с актуальными российскими и международными исследованиями.

5) Прирост ежегодного электропотребления со стороны электротранспорта рассчитывается путем умножения количества электромобилей на их средний пробег и удельный расход электроэнергии на 100 км пробега (легковые авто и электробусы рассчитываются по отдельности и затем суммируются).

При выполнении оценок затрат на создание необходимой зарядной инфраструктуры следует также учитывать неопределенность в темпах снижения удельной стоимости зарядных устройств и количестве транспорта. В этой связи расчет был выполнен при базовой стоимости зарядных устройств, указанной выше (далее – базовый вариант), и при их постепенном удешевлении на 40% к 2050 г. (далее – оптимистический вариант).

Для каждого из вариантов по стоимости зарядных устройств (ЗУ) рассмотрено разное сочетание их типов ЗУ, обеспечивающих одинаковую ежедневную емкость в 14.5 млн подключений (подключение 13.2 млн электромобилей и 10%-й резерв для экстренной подзарядки).

А) подвариант “Зарядка у дома” основан на допущении, что каждый легковой автомобиль будет иметь свою домашнюю зарядную станцию уровня 2 (стоимостью 1836 долл., табл. 3), заряжаясь в основном в период длительного простоя (например, в ночные часы, а электробусы – в периоды между выходами на рейс). Таким образом, в этом варианте число домашних ЗУ будет равно общему парку легковых электромобилей. Число общественных ЗУ уровня 3 определяется из резерва в 10% подключений и обслуживания в среднем 10 электромобилей в день (включая и электробусы).

Б) подвариант “Общественная зарядная инфраструктура” предполагает, что дневная емкость подключений легковых электромобилей одинаково распределена между общественными и домашними зарядными станциями¹. Для электробусов рассматривается только общественная инфраструктура. Этот подвариант позволит сократить общее количество ЗУ в системе и сделать их более “концентрированными”. С другой стороны, возрастет совокупная стоимость создания такой инфраструктуры (табл. 4).

В подварианте “Зарядка у дома” при базовой стоимости зарядных устройств совокупный объем инвестиций в инфраструктуру в целом за период составит 2.9 трлн рублей в реальном выражении (41.5 млрд долл. США по курсу 70 руб./долл.). При удешевлении зарядных устройств (оптимистический вариант по их стоимости) инфраструктурные затраты могут быть снижены до 2.1 трлн рублей в реальном выражении. В сравнении со стоимостью парка обслуживаемых электромобилей по состоянию на 2050 г. расходы на создание зарядной инфраструктуры составляют 10–15%.

¹ В этом случае значительная часть автовладельцев (прежде всего жители многоквартирных домов) не будут иметь собственных зарядных станций рядом с домом, а будут пользоваться исключительно общественными устройствами (паркинги, торговые центры и т.д.)

Таблица 4. Прогноз затрат на создание зарядной инфраструктуры для электромобилей в России на перспективу до 2050 г.

		2025 г.	2030 г.	2035 г.	2040 г.	2045 г.	2050 г.	Всего 2022–2050
Парк электромобилей	млн штук	0.1	0.7	2.8	6.2	10.0	13.2	
из них:								
легковые	млн штук	0.1	0.7	2.7	6.0	9.7	12.9	
автобусы	млн штук	0.01	0.05	0.12	0.20	0.25	0.30	
Число зарядных устройств (ЗУ):								
<i>Вариант 1 (10 авто на общественную розетку, 1 авто на домашнюю розетку)</i>								
– общественные ЗУ (автобусы)	млн штук	0.00	0.02	0.04	0.07	0.08	0.10	
– общественные ЗУ (легковые)	млн штук	0.00	0.01	0.03	0.06	0.10	0.13	
– домашние ЗУ	млн штук	0.1	0.7	2.7	6.0	9.7	12.9	
<i>Вариант 2 (одинаковое число общественных и домашних розеток)</i>								
– общественные ЗУ (автобусы)	млн штук	0.00	0.02	0.04	0.07	0.08	0.10	
– общественные ЗУ (легковые)	млн штук	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	
– домашние ЗУ	млн штук	0.0	0.4	1.5	3.3	5.4	7.1	
Число ЗУ с учетом замещения выбывающих (срок службы 7 лет)								
<i>Вариант 1 (10 авто на общественную розетку, 1 авто на домашнюю розетку)</i>								
– общественные -ЗУ (автобусы)	млн штук	0.00	0.02	0.04	0.09	0.14	0.18	
– общественные ЗУ (легковые)	млн штук	0.00	0.01	0.03	0.08	0.14	0.21	
– домашние ЗУ	млн штук	0.07	0.68	3.00	7.71	14.38	21.31	
<i>Вариант 2 (одинаковое число общественных и домашних розеток)</i>								
– общественные ЗУ (автобусы)	млн штук	0.00	0.02	0.04	0.09	0.14	0.18	
– общественные ЗУ (легковые)	млн штук	0.00	0.04	0.17	0.42	0.79	1.17	
– домашние ЗУ	млн штук	0.04	0.37	1.65	4.24	7.91	11.72	
Базовый вариант по стоимости ЗУ								
– общественные ЗУ	долл./шт.	6000	6000	6000	6000	6000	6000	
– домашние ЗУ	долл./шт.	1836	1836	1836	1836	1836	1836	
Оптимистический вариант по стоимости ЗУ								
– общественные ЗУ	долл./шт.	6000	5520	5040	4560	4080	3600	
– домашние ЗУ	долл./шт.	1836	1689	1542	1395	1248	1102	
Итого затраты								
Вариант 1 (10 авто на общественную станцию, 1 авто на домашнюю станцию)								
<i>Базовый вариант по стоимости ЗУ</i>								
– общественные ЗУ	млрд долл	0.01	0.10	0.07	0.12	0.12	0.11	2.3
– домашние ЗУ	млрд долл	0.1	0.3	1.0	1.9	2.3	2.1	39.1
– всего	млрд долл	0.1	0.4	1.1	2.0	2.4	2.2	41.5
То же в рублях по курсу 70 руб./долл.	млрд руб.	9.5	29.1	76.6	139.6	169.3	156.8	2902
<i>Оптимистический вариант по стоимости ЗУ</i>								
– общественные ЗУ	млрд долл	0.01	0.09	0.06	0.09	0.08	0.07	1.7
– домашние ЗУ	млрд долл	0.1	0.3	0.9	1.4	1.6	1.3	28.5
– всего	млрд долл	0.1	0.4	0.9	1.5	1.6	1.3	30.2
То же в рублях по курсу 70 руб./долл.	млрд руб.	9.5	26.8	64.4	106.1	115.1	94.1	2116
Вариант 2 (одинаковое число общественных и домашних розеток)								
<i>Базовый вариант по стоимости ЗУ</i>								
– общественные ЗУ	млрд долл	0.03	0.15	0.22	0.40	0.46	0.42	8.1
– домашние ЗУ	млрд долл	0.1	0.2	0.6	1.0	1.3	1.2	21.5
– всего	млрд долл	0.1	0.3	0.8	1.4	1.7	1.6	29.6
То же в рублях по курсу 70 руб./долл.	млрд руб.	6.9	22.4	55.0	99.9	120.7	111.6	2072
<i>Оптимистический вариант по стоимости ЗУ</i>								
– общественные ЗУ	млрд долл	0.03	0.13	0.19	0.30	0.31	0.25	5.9
– домашние ЗУ	млрд долл	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.7	15.7
– всего	млрд долл	0.1	0.3	0.7	1.1	1.2	1.0	21.6
То же в рублях по курсу 70 руб./долл.	млрд руб.	6.9	20.6	46.2	75.9	82.1	67.0	1512

В подварианте “Общественная зарядная инфраструктура” инвестиции в нее будут ниже за счет концентрации мощностей на общественных зарядных станциях. Объем инвестиций в инфраструктуру составит 2.1 трлн рублей при базовой динамике цен на ЗУ или 1.5 трлн рублей при их оптимистической динамике. В процентном выражении инфраструктурные затраты составят 7–10% от прогнозной стоимости парка электромобилей в России в 2050 г.

Расчеты показывают, что стоимость зарядной инфраструктуры оказывается существенной дополнительной статьей общественных (народнохозяйственных) расходов, которую необходимо учитывать при системной оценке эффективности развития электротранспорта. Еще одной статьей дополнительных затрат является расширение и усиление распределительной сети для питания распределенной системы зарядных станций. Эти затраты сильно различаются по типам населенных пунктов, так как связаны с соотношением общественных и домашних станций, с протяженностью распределительных линий (как правило, кабельных), с классами напряжения, и с исполнением (уличное, встроенное в новых зданиях, встраиваемое в существующие объекты и проч.). В настоящее время доступность этих данных (в т.ч. по уже реализованным проектам) ограничена, однако в перспективе анализ и обобщение этой информации позволит также включить этот фактор в процесс оптимизации эффективных объемов энергозамещения в транспортном секторе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электрификация дорожного транспорта является мощным инструментом снижения эмиссии парниковых газов в транспортном секторе, оказывая при этом и заметное влияние на декарбонизацию экономики в целом. Однако в текущих условиях электромобили не являются конкурентоспособными по критерию приведенной стоимости владения, учитывающему полный спектр затрат, связанных с приобретением и эксплуатацией автомобиля за весь его жизненный цикл (срок службы). Так, по состоянию на 2021 г., легковые электромобили оказываются примерно на 60–65% дороже своих бензиновых аналогов. Примерно такой же разрыв отмечается в сопоставлении электробусов с традиционными автобусами на дизеле. К 2030 году даже при прогнозируемом удешевлении аккумуляторов электрифицированный транспорт по-прежнему будет уступать своим топливным аналогам около 25% по приведенной стоимости владения. Лишь при условии снижения капитальных затрат на единицу автотранспорта не менее чем на 40–45% по сравнению с текущим их уровнем (что на практике возможно лишь при локализации производства электромобилей на территории России) становится возможным достижение стоимостного паритета электромобилей с классическими моделями автомашин как в легковом, так и крупнопассажирском секторе перевозок. Конкурентоспособность электротранспорта может быть обеспечена и за счет субсидирования стоимости капитала (ставки дисконтирования) – примерно до уровня в 2.5%.

Тем не менее оценка полных общественных затрат на интеграцию электрифицированного транспорта требует еще и учета расходов на создание зарядной инфраструктуры. По первым весьма укрупненным расчетам этот объем составляет от 7 до 15% от стоимости самого автопарка электрифицированного транспорта по состоянию на 2050 г. (без учета мероприятий по техприсоединению зарядных устройств к энергосистеме и модернизации распределительных сетей, которые, вероятно, будут еще более капиталоемкими).

Таким образом, на горизонте до 2030 г. развитие электрифицированного транспорта не будет самокупаемым и потребует значительных государственных мер прямой или косвенной поддержки в создание необходимой зарядной инфраструктуры, не говоря уже о необходимости соответствующей модернизации электросетевого комплекса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-79-30013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEA. The role of CCUS in low-carbon power systems. August 2020. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/ccdcb6b3-f6dd-4f9a-98c3-8366f4671427/The_role_of_CCUS_in_low-carbon_power_systems.pdf (дата обращения 24.05.2022)
2. Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 г. (утв. Распоряжением Правительства РФ от 23 августа 2021 г. № 2290-р)
3. Аналитическое агентство Pew Research. URL: <https://www.pewresearch.org/fact-tank/2021/06/07/todays-electric-vehicle-market-slow-growth-in-u-s-faster-in-china-europe/> (дата обращения 24.05.2022)
4. IEA. World Energy Outlook 2021. November 2021.
5. Bloomberg Battery Cost Survey 2021. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-11-30/battery-price-declines-slow-down-in-latest-pricing-survey> (дата обращения 24.05.2022)
6. Funke S.A., Sprei F., Gnann T., Plötz P. How much charging infrastructure do electric vehicles need? A review of the evidence and international comparison. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, V. 77, December 2019, P. 224–242. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.024>
7. Borlaug B., Salisbury S., Gerdes M., Muratori M. Levelized Cost of Charging Electric Vehicles in the United States. *Joule*, V. 4. I. 7. 15 July 2020, P. 1470–1485. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.05.013>
8. Ellram L.M. Total cost of ownership: An analysis approach for purchasing. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, V. 25. № 8. 1995. pp. 4–23.
9. Cradle-to-Grave Lifecycle Analysis of U.S. Light-Duty Vehicle-Fuel Pathways: A Greenhouse Gas Emissions and Economic Assessment of Current (2015) and Future (2025–2030) Technologies. Argonne National Laboratory, report ANL/ESD-16/7, Rev. 1. September 2016. <https://greet.es.anl.gov/publication-c2g-2016-report>
10. Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains. Argonne National Laboratory, Report # ANL/ESD-21/4, April 2021.
11. Официальный сайт компании Nissan. — URL: <https://www.nissanusa.com/vehicles/electric-cars/leaf.html>
12. Кто заменит электробус? / За рулем, 2020. https://www.zr.ru/content/articles/933331-кто-zamenit-ehlektrobus/?from=feed&utm_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com
13. SAE Electric Vehicle and Plug-in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler, SAE J1772, Jan. 2010.

Technical and Economic Analysis of the Efficiency of Electrified Road Transport Deployment in Russia

A. I. Solyanik^a, * and F. V. Veselov^a

^a*Energy Research Institute of RAS, Moscow, Russia*

**e-mail: andsolyanik@yandex.ru*

The article presents a methodology for comparing different (regarding the type of fuel/energy carrier used) types of road transport via the criterion of their comparative economic efficiency (the total discounted cost of owning a vehicle over its life cycle). Based on this indicator, an economic comparison of traditional fossil fuel cars and buses and electrified ones was made. Scenario calculations, made under different assumptions about the future cost of electric vehicles, demonstrate the limited conditions under which they can achieve cost competitiveness with traditional vehicles. In addition, the paper also quantifies the potential amount of costs required for the development of charging infrastructure for electric vehicles. It was shown that this additional costs almost doubles the cost of owning electric vehicle itself.

Keywords: transport sector, electric vehicles, economic efficiency, total discounted cost of ownership, charging infrastructure