Сравнительный анализ стоимости владения электромобилями в зависимости от типов их энергоустановок

Е. А. Бузоверов, А. З. Жук и Б. В. Клейменов
Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

E-mail: teoconsult@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2018 г.

Аннотация. В работе приведен порядок расчета и анализ стоимости владения электромобилями, оснащенными энергоустановками различных типов. Расчет проведен для батарейных электромобилей с подзарядкой от электросети, электромобилей с бортовым воздушно-водородным электрохимическим генератором, и электромобилей с бортовым воздушно-алюминиевым электрохимическим генератором. Расчет дифференцирован для легкового электромобиля индивидуального пользования и легкого коммерческого грузовика. Стоимость владения выражается в затратах на энергоустановку и расходуемый энергоноситель за жизненный цикл транспортного средства. Показано, что в качестве энергоустановки наиболее выгодно применять воздушно-алюминиевый электрохимический генератор: стоимость владения как легковым, так и грузовым электромобилем такого типа в 1.5–2 раза ниже по сравнению с батарейным электромобилем и в 3–4 раза ниже по сравнению с электромобилем с воздушно-водородным электрохимическим генератором. Преимущество применения алюминия в качестве энергоносителя для транспортных средств заключается в простоте и дешевизне энергоустановки и заправочной инфраструктуры в сравнении с таковыми для батарейных и водородных энергоустановок, что компенсирует высокую стоимость алюминия и обеспечивает перспективность его применения. При этом существенную роль играет возможность повторного использования алюминия, т.е. организация замкнутого цикла его использования. Следует подчеркнуть, что гидроокись алюминия (продукт реакции электрохимического окисления) является высококачественным сырьем для его повторного производства. Электромобили на алюминиевом энергоносителе оказываются весьма конкурентоспособными в странах с развитой алюминиевой индустрией и имеющими доступные энергоресурсы.
https://doi.org/10.33849/2018125

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире наблюдается тенденция к уменьшению зависимости энергетики, в особенности транспортной, от углеводородного топлива. Государственные структуры и автомобильные корпорации развитых стран инвестируют существенные средства в передовые исследования и разработки батарейных и водородных электромобилей (ЭМ), субсидируют их производство и приобретение, применяют различные меры экономического и административного стимулирования потребителей и производителей [1, 2]. Значительно меньшее внимание уделяется созданию и внедрению электротранспорта на основе воздушно-металлических, в частности, воздушно-алюминиевых электрохимических генераторов (ВА ЭХГ), хотя подобные разработки более или менее успешно ведутся на протяжении последних тридцати лет [3–5]. ВА ЭХГ конструктивно проще, дешевле и безопаснее воздушно-водородных аналогов. Создание зарядной инфраструктуры электромобилей на основе ВА ЭХГ не требует радикальной реконструкции электросетевого хозяйства, необходимой при массовом внедрении батарейных электромобилей.

Целью данной работы является сравнительный анализ экономической эффективности городских электромобилей, использующих в качестве источников энергии: i) литий-ионный аккумулятор; ii) воздушно-водородный электрохимический генератор (ВВ ЭХГ); iii) воздушно-алюминиевый электрохимический генератор. В качестве критерия эффективности технологии выбрана стоимость владения электромобилем, приведенная к полному времени его эксплуатации.

2. РАСЧЕТ СТОИМОСТИ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

На стоимость жизненного цикла транспортной технологии оказывают влияние следующие затраты: стоимость энергоустановки электромобиля, затраты на производство и доставку соответствующего энергоносителя, затраты на необходимую инфраструктуру — сеть зарядных или заправочных станций. Принято допущение о том, что стоимость шасси, кузова, электродвигателя и прочих элементов электромобиля не отличается существенно при использовании различных энерготехнологий.

Необходимое количество энергоносителя для расчетного запаса хода электромобиля W, кВт·ч можно рассчитать исходя из следующего соотношения:

$$W = L\,q, \tag{1}$$

где L — запас хода электромобиля, км; q — удельный расход электроэнергии на пробег электромобиля, кВт·ч/100 км [6].

Стоимость энергоустановок электромобилей будет определяться стоимостью основных или буферных аккумуляторов, электрохимических генераторов и бака для топлива (при наличии) — C, USD.

Стоимость энергоустановки батарейного электромобиля определяется только стоимостью батареи:

$$C = \frac{W}{DoD}\,(100\% + k_{\rm b})\,C_{\rm cap}^{\rm bat}, \tag{2}$$

где $k_{\rm b}$ — коэффициент стоимости балансировочного устройства батареи, % от стоимости батареи; DoD —

допустимая глубина разрядки (Depth of Discharge) аккумуляторной батареи, %; $C_{\text{cap}}^{\text{bat}}$ — удельная стоимость батареи, USD/кВт·ч [7].

Стоимость энергоустановки водородного электромобиля определяется стоимостью батареи топливных элементов, буферной аккумуляторной батареи и водородного бака:

$$C = W_{\text{add}} C_{\text{cap}}^{\text{bat}} \left(1 + \frac{k_{\text{b}}}{100\%}\right) + N_{\text{h}} C_{\text{cap}}^{\text{fc}} + \frac{W}{Q_{\text{h}}} C_{\text{cap}}^{\text{tank}}, \quad (3)$$

где W_{add} — емкость буферной литий-ионной батареи, кВт·ч; $C_{\text{cap}}^{\text{fc}}$ — удельная стоимость батареи топливных элементов водородного электромобиля, USD/кВт [8, 9]. $C_{\text{cap}}^{\text{tank}}$ — удельная стоимость топливного бака водородного электромобиля, USD/кВт·ч; Q_{h} — теплотворная способность водорода, кВт·ч/кг; N_{h} — мощность топливного элемента, кВт:

$$N_{\text{h}} = \frac{W\,v}{L}, \quad (4)$$

где v — средняя скорость движения электромобиля, км/ч, L — дальность хода электромобиля без подзарядки, км.

Стоимость энергоустановки электромобиля с ВА ЭХГ определяется стоимостью ВА ЭХГ и буферной аккумуляторной батареи:

$$C = W_{\text{add}} C_{\text{cap}}^{\text{bat}} \left(1 + \frac{k_{\text{b}}}{100\%}\right) + \frac{W}{Q_{\text{al}}} C_{\text{cap}}^{\text{alfc}}, \quad (5)$$

где Q_{al} — теплотворная способность алюминия, кВт·ч/кг; $C_{\text{cap}}^{\text{alfc}}$ — удельная стоимость ВА ЭХГ, USD/кВт·ч [4].

3. РАСЧЕТ СТОИМОСТИ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ С УЧЕТОМ ЗАТРАТ НА ЗАРЯДНУЮ/ЗАПРАВОЧНУЮ ИНФРАСТРУКТУРУ

3.1. Зарядка электроэнергией от сети

Станции зарядки батарейных электромобилей эксплуатируются без присутствия постоянного обслуживающего персонала, на станциях заправки водородом и алюминием необходимо наличие 2 человек в смену.

Годовые эксплуатационные затраты станции зарядки/заправки электромобиля C_{opex}, USD/год, составляют:

$$C_{\text{opex}} = C_{\text{power}} + C_{\text{e}} + C_{\text{wage}} + C_{\text{O\&M}} + C_{\text{other}}, \quad (6)$$

где C_{power} — плата за электрическую мощность, USD/год; C_{e} — затраты на электроэнергию для технологических нужд заправки, USD/год; C_{wage} — заработная плата персонала с налоговыми отчислениями, USD/год; $C_{\text{O\&M}}$ — затраты на обслуживание и ремонт оборудования, USD/год — 3% от капитальных затрат; C_{other} — прочие и непредвиденные расходы, USD/год — 10% от текущих затрат.

Стоимость энергоносителя, отпускаемого с зарядной/заправочной станции, USD/кВт·ч, составляет:

$$c_{\text{t}} = c_{\text{e}} + \frac{Prof + C_{\text{opex}} + C_{\text{cap}}\,CRF}{365\,n_{\text{ev}}\,W}, \quad (7)$$

где $Prof$ — прибыль оператора сети зарядных/заправочных станций, $Prof = 0,081 C_{\text{opex}}$, USD/год; C_{cap} — стоимость станции заправки/зарядки электромобиля, USD; n_{ev} — количество обслуживаемых электромобилей в сутки, шт.; c_{e} — стоимость соответствующего энергоносителя, USD/кВт·ч; CRF — коэффициент возврата капитала:

$$CRF = \frac{d}{1 - (1 + d)^{-n}}, \quad (8)$$

где d — стоимость капитала (безразмерная величина) [10], n — продолжительность жизненного цикла станции зарядки, лет.

3.2. Водородное топливо

Рассматривается три варианта доставки водорода до станций заправки водородных электромобилей. По вариантам 1 и 2 требуется перевезти водород автомобильным транспортом от места его крупнотоннажного производства на заправочную станцию. В варианте 1 — в сжатом состоянии (рисунок 1), в варианте 2 — в сжиженном. В варианте 3 водород производится непосредственно на заправке методом электролиза (рисунок 2).

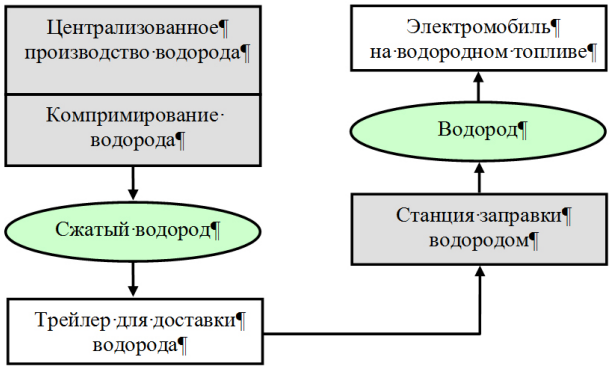


Рисунок 1. Схема использования сжатого водорода по варианту 1.

Схема использования сжиженного водорода аналогична схеме со сжатым водородом, но на этапе производства газ подвергается ожижению и доставляется на заправку в криогенном виде. Перед заправкой водород переводится в газообразное состояние.

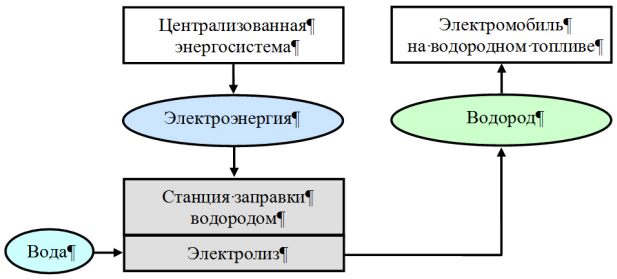


Рисунок 2. Производство водорода методом электролиза непосредственно на заправке.

Если стоимость энергоносителя для зарядки батарейного электромобиля (стоимость электроэнергии из

централизованной энергосистемы) и для заправки водородного транспортного средства (сжатый или сжиженный водород) известна [1, 11, 12], то стоимость алюминия для топливных целей нуждается в пояснении.

3.3. Алюминиевое топливо

Внедрение и эффективное использование алюминиевого топлива требует создания соответствующей инфраструктуры, позволяющей осуществлять производство анодов для ВА ЭХГ, доставку их на станции перезарядки и возврат гидроокиси алюминия на глиноземно-алюминиевый комбинат для регенерации. Предполагается, что в качестве электролита используется щелочь и осаждение гидроокиси из отработанного электролита производится на станции перезарядки ВА ЭХГ [3]. Технология осаждения хорошо известна и описана, например, в [13].

Схема топливного цикла для электромобиля на алюминиевом топливе приведена на рисунке 3.

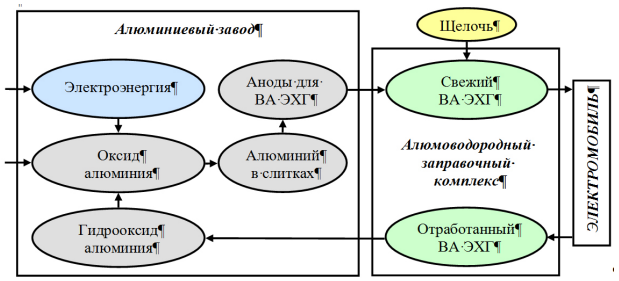


Рисунок 3. Схема топливного цикла для электромобиля на алюминиевом топливе.

Затраты на алюминиевое топливо складываются из нескольких составляющих: i) затраты на производство алюминия из глинозема [3, 14]; ii) затраты на изготовление алюминиевых анодов; iii) затраты на транспортно-логистические услуги для перевозки анодных пластин от заводов-изготовителей до станций перезарядки ВА ЭХГ и стоимость транспортировки на глиноземно-алюминиевый комбинат; iv) учитывается возвращаемая в цикл производства алюминия гидроокись (продукт реакции электрохимического окисления Al); v) прибыль оператора инфраструктуры зарядки и вторичного использования алюминия.

Средневзвешенная стоимость алюминия C_{al}, USD/кг, получаемого при возврате части продуктов окисления в топливный цикл, и учитывающая затраты на изготовление анодов:

$$C_{\mathrm{al}} = \left(1 - \frac{k_{\mathrm{rec}}}{100\%}\right)(c_{\mathrm{alumina}}\, m_{\mathrm{alumina}} + e_{\mathrm{al}}\, m_{\mathrm{el}} + C_{\mathrm{other}}) \times \left(1 + \frac{k_{\mathrm{raf}}}{100\%}\right) + \frac{k_{\mathrm{rec}}}{100\%}(e_{\mathrm{al}}\, m_{\mathrm{el}} + C_{\mathrm{other}}) + C_{\mathrm{prod}}, \quad (9)$$

где k_{rec} — доля возврата продуктов окисления в топливный цикл, %; C_{prod} — затраты на изготовление анодов из алюминия, USD/кг; C_{other} — прочие издержки, USD/кг; k_{raf} — коэффициент, учитывающий затраты на рафинирование алюминия, % от стоимости первичного алюминия технической чистоты A95; C_{alumina} — цена глинозема, USD/кг; m_{alumina} — удельное потребление глинозема на производство алюминия, кг/кг алюминия; e_{al} — цена на электроэнергию для алюминиевого завода, USD/кВт·ч; m_{el} — удельное потребление электроэнергии на производство алюминия, кВт·ч/кг [15].

Стоимость алюминия также может быть рассчитана в USD/кВт·ч:

$$c_{\mathrm{e}} = \frac{C_{\mathrm{al}}\, 100\%}{Q_{\mathrm{al}}\, \eta}, \quad (10)$$

где Q_{al} — теплотворная способность алюминия, кВт·ч/кг; η — КПД энергоустановки электромобиля, %.

4. РАСЧЕТ СТОИМОСТИ ПРОБЕГА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Стоимость владения электромобилем определяется стоимостью энергоустановки и затратами на электроэнергию.

Для легкового электромобиля рассчитываются затраты на 100 км пробега $C_{100\,\mathrm{km}}$, USD/100 км:

$$C_{100\,\mathrm{km}} = c_{\mathrm{t}} q + \frac{C\,CRF}{L_{\mathrm{year}}^{\mathrm{car}}} 100\, km, \quad (11)$$

где $L_{\mathrm{year}}^{\mathrm{car}}$ — годовой пробег легкового электромобиля, принимается равным 15 тыс. км/год [2]; c_{t} — стоимость энергоносителя, отпускаемого с зарядной/заправочной станции, USD/кВт·ч; q — удельный расход энергии на пробег электромобиля, кВт·ч/100 км.

Для легкого коммерческого грузовика рассчитываются затраты на тонно-километр (т·км) $C_{\mathrm{ton\,km}}$, USD/т·км:

$$C_{\mathrm{ton\,km}} = \left(c_{\mathrm{t}} q + \frac{C\,CRF}{L_{\mathrm{year}}^{\mathrm{van}}}\right) m^{-1}, \quad (12)$$

где $L_{\mathrm{year}}^{\mathrm{van}}$ — годовой пробег легкого грузового коммерческого электромобиля, тыс. км [16]; m — грузоподъемность грузового электромобиля типа “Газель NEXT Электро”, т. Для водородного электромобиля и транспортного средства на алюминиевом топливе грузоподъемность корректируется по сравнению с батарейным электромобилем на разницу масс между тяговой батареей и энергоустановками водородно-воздушного либо алюмо-воздушного генератора.

5. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

В таблице 1 приведены основные исходные данные для выполнения расчета стоимости жизненного цикла электромобилей с подзарядкой от электросети, с бортовым воздушно-водородным электрохимическим генератором и с бортовым воздушно-алюминиевым электрохимическим генератором.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В таблице 2 и на рисунке 4 приведены результаты расчета структуры энергоносителей для ЭМ при сроке эксплуатации заправочной инфраструктуры 20 лет.

На рисунке 5 (а, б) представлены результаты расчетов приведенных затрат на топливо и энергоустановку при эксплуатации легкового автомобиля (USD/100 км) и легкого коммерческого грузовика типа “Газель Next

Таблица 1. Основные исходные данные.

Показатель	Ед. изм.	Значение	Обозн.	Источн. данных
Удельный расход электроэнергии на пробег электромобиля	кВт·ч/100 км	18	q	[6]
Удельная стоимость литий-ионных аккумуляторных батарей	USD/кВт·ч	300	$C_{\mathrm{cap}}^{\mathrm{bat}}$	[7]
Удельная стоимость водородных топливных элементов	USD/кВт	4000	$C_{\mathrm{cap}}^{\mathrm{fc}}$	[8, 9]
Удельная стоимость ВА ЭХГ	USD/кВт·ч	77	$C_{\mathrm{cap}}^{\mathrm{alfc}}$	[4]
Стоимость крупнотоннажного производства водорода методом паровой конверсии метана	USD/кг	3	$H_{\mathrm{prod\,centr}}^{1;2}$	[17]
Удельный расход электроэнергии на производство водорода электролитическим способом	кВт·ч/кг	60	B_{h}	[1]
Удельное потребление электроэнергии на производство алюминия	кВт·ч/кг	16	m_{el}	[15]
Коэффициент реверсных поставок в алюминиевом цикле		2.89	k_{rev}	
Грузоподъемность батарейного грузового электромобиля	кг	950	m_{e}	[18, 19]
Энергоемкость аккумуляторной установки батарейного электромобиля	кВт·ч/кг	0.15	M_{bat}	[20]
КПД ВВ ЭХГ	%	43	η_{h}	[17]
Энергоемкость энергоустановки водородного электромобиля	кВт/кг	0.4	M_{FC}	[21]
КПД ВА ЭХГ	%	42	η_{alfc}	[4]
Энергоемкость энергоустановки электромобиля на алюминиевом топливе	кВт·ч/кг	0.27	M_{alfc}	[4]

Таблица 2. Структура затрат на энергоносители, USD/кВт·ч.

Показатель	Батарейный электромобиль	Водородный электромобиль			Al электромобиль
		Сжатый водород	Сжиженный водород	Электролизный водород	
Производство энергоносителя	0.020	0.178	0.178	0.357	0.844
Сжатие/ожижение водорода	—	0.024	0.036	0.024	0.024
Транспорт энергоносителя	0.010	0.120	0.108	—	—
Заправка/зарядка электромобиля	0.113	1.529	1.733	1.936	1.437
ИТОГО:	1.243	1.851	2.055	2.317	2.305

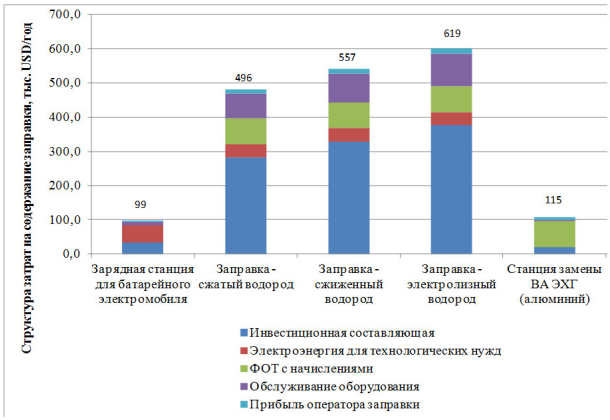


Рисунок 4. Структура затрат на содержание заправок ЭМ.

Электро" (USD/т·км) на альтернативных видах топлива.

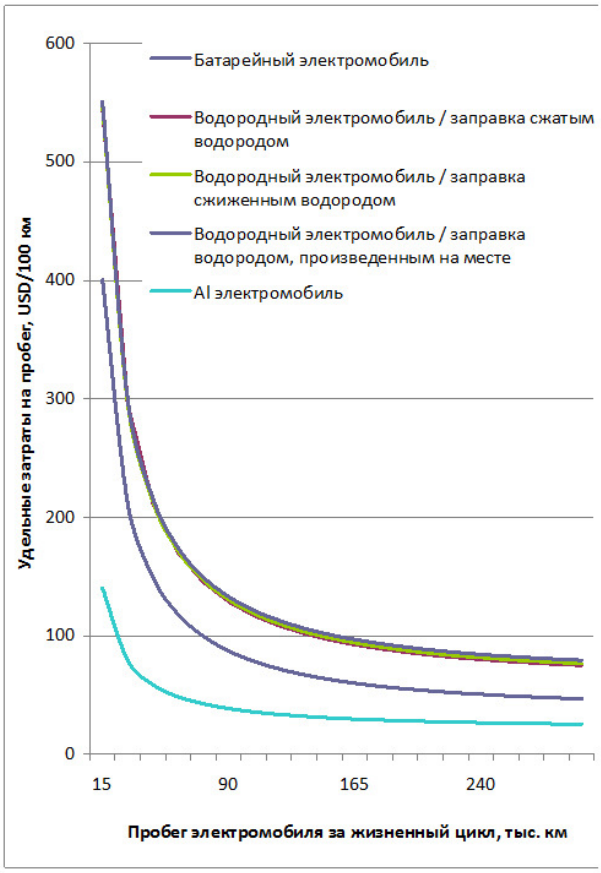
В расчетах принимается пробег легкового электромобиля до полного износа — 300 тыс. км [19]. Пробег грузового электромобиля — 500 тыс. км. Современные литий-железо-фосфатные аккумуляторы имеют ресурс до 4000 циклов, ресурс ВВ ЭХГ и ВА ЭХГ в перспективе должен достигать 10–15 тыс. часов, что достаточно для обеспечения указанного пробега электромобилей без замены энергоустановки.

Из графиков видно, что наиболее экономичным вариантом экологически чистых транспортных средств является электромобиль на алюминиевом топливе. Для легкового электромобиля совокупные затраты на использование воздушно-алюминиевого ЭХГ в 2 раза ниже по сравнению с литий-ионной батареей и в 3 раза ниже по сравнению с водородным ЭХГ.

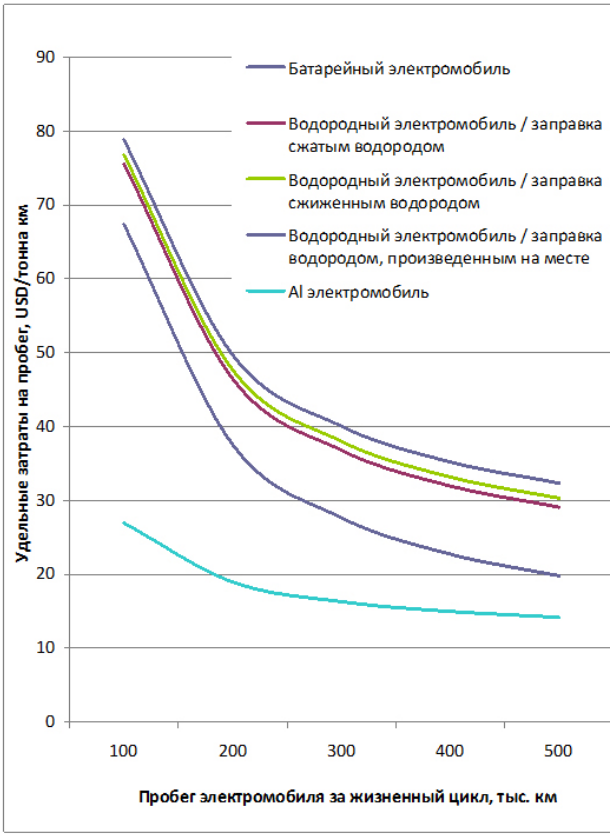
Для коммерческого грузовика тенденция большей экономичности алюминиевого ЭХГ по сравнению с батарейными и водородными аналогами сохраняется. В этом случае, несмотря на значительные топливные затраты, ВА ЭХГ имеет меньшую массу по сравнению с литий-ионной батареей аналогичной энергоемкости, что позволяет достичь большей грузоподъемности транспортного средства, а следовательно и приемлемых затрат на тонно-км. Совокупные затраты на использование воздушно-алюминиевого ЭХГ в 1,5–2 раза ниже по сравнению с литий-ионной батареей и в 2–3 раза ниже по сравнению с водородным ЭХГ.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Легковые и грузовые малотоннажные транспортные средства с ВА ЭХГ имеют хорошие перспективы для использования в качестве альтернативы батарейным и водородным электромобилям. Инфраструктура для них оказывается дешевле, может быть развернута практически в любом регионе. Сами транспортные сред-



(*a*)



(*b*)

Рисунок 5. Удельные затраты на эксплуатацию электромобиля: (*a*) легкового, USD/100 км; (*b*) грузового, USD/т·км.

ства также имеют меньшую стоимость, замена анодов и электролита в них не связана с опасностью поражения электрическим током или взрыва. Эта процедура менее технологична по сравнению с зарядкой электромобилей электроэнергией или заправкой водородом, но совокупные затраты на эксплуатацию такого рода транспортных средств оказываются ниже. Экономические преимущества электромобилей на алюминии в большей степени проявляются для легковых транспортных средств с относительно небольшим годовым пробегом.

Стоимость алюминия в качестве топлива оказывается несколько выше стоимости электроэнергии, но ниже стоимости водорода. Приемлемые стоимостные показатели энергетического алюминия достигаются за счет организации замкнутого топливного цикла – возврата гидроокиси алюминия в цикл производства металла.

Стоимость зарядных станций для электромобилей с ВА ЭХГ и батарейных ЭМ сопоставима и существенно ниже стоимости водородных заправочных станций.

И, наконец, сама энергоустановка для транспортного средства на алюминии существенно дешевле литий-ионных батарей и водородных ЭХГ.

В перспективе индустрия использования электромобилей на алюминии может развиваться параллельно с батарейным и водородным транспортом. Наибольшее распространение технологии алюмоэнергетики могут получить в регионах со слаборазвитой электросетевой инфраструктурой, а также с дешевыми энергоресурсами, что позволяет эффективно организовать замкнутый цикл производства алюминия.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках программы № 56 Президиума РАН «Фундаментальные основы прорывных технологий в интересах национальной безопасности».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baronas J and Achtelik G 2017 Annual assessment of time and cost needed to attain 100 hydrogen refueling stations in california URL `https://www.energy.ca.gov/2017publications/CEC-600-2017-011/CEC-600-2017-011.pdf`
2. International Energy Agency I E A 2018 Global EV outlook 2018: Towards cross-modal electrification URL `https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/globalevoutlook2018.pdf`
3. Yang S and Knickle H 2002 *J. Power Sources* **112** 162–73
4. Ilyukhina A V, Kleymenov B V and Zhuk A Z 2017 *J. Power Sources* **342** 741–9
5. Phinergy 2018 Delivering clean energy. anytime. anywhere URL `http://www.phinergy.com`
6. Department of Energy U S 2018 Compare electric cars side-by-side URL `https://www.fueleconomy.gov/feg/PowerSearch.do?action=noform&path=1&year1=1984&year2=2019&vtype=Electric`
7. Few S, Schmidt O, Offer G, Brandon N, Nelson J and Jambhir A 2018 *Energy Policy* **114** 578–90
8. Penev M 2013 Hybrid hydrogen energy storage *Report* All-Energy 2013 (Aberdeen, UK: NREL Laboratory)
9. Fuel Cell Store 2018 Horizon 5000W PEM fuel cell URL `http://www.fuelcellstore.com/horizon-5000watt-fuel-cell-h-5000`

10. Ereev S and Patel M 2012 *Journal of Business Chemistry* **9** 31–48
11. АО "АТС" 2018 Прогноз средневзвешенных нерегулируемых цен на электроэнергию и мощность по ГТП на октябрь 2018 года URL `http://www.atsenergo.ru`
12. Департамент экономической политики и развития г Москвы 2018 Приказ № 486-ТР от 26.12.2017. Об установлении единых (котловых) тарифов на услуги по передаче электрической энергии по сетям г. Москвы на 2018 год URL `https://www.mos.ru/depr/documents/normativno-pravovye-akty-departamenta/view/211058220`
13. Романов Л Г 1981 *Разложение алюминатных растворов* (Алма-Ата: Наука КазССР)
14. Жук А З, Клейменов Б В, Фортов В Е и Шейндлин А Е 2012 *Электромобиль на алюминиевом топливе* (Москва: Наука)
15. UC RusAl 2018 4q 2017 and 12m 2017 financial results presentation URL `www.rusal.ru`
16. Sripad S and Venkatasubramanian V 2018 Quantifying the economic case for electric semi-trucks *Report* (Pittsburgh, PA: Department of Mechanical Engineering, Carnegie Mellon University)
17. Körner A 2015 Technology roadmap: Hydrogen and fuel cells *Report* (International Energy Agency (IEA))
18. ООО "Лиотех" 2018 Электромобиль ГАЗ-3302 "Газель" URL `http://www.liotech.ru/gaz`
19. ООО "Спецавтоинжиниринг" 2018 Электромобиль "NEXT Electro" URL `http://sai-holding.ru/teh_resh/prospekt_nextelectro_v1.pdf`
20. Gröger O, Gasteiger H A and Suchsland J P 2015 *J. Electrochem. Soc.* A **162 (14)** 2605–22
21. Sisco J, Robinson P and Osenar P 2017 New fuel cell technologies extend missions for vertical take-off and landing unmanned aerial vehicles *Report* AUVSI Expo 2017