

УДК 621.43

О.Б. Тихомирова, А.Н. Тихомиров  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

В статье рассмотрена экономическая и экологическая целесообразность масштабного перехода автотранспорта на электропривод, отражены ключевые вопросы, учитываемые при оценке эффективности, представлены причины повышенных расходов электроэнергии. Приведены основные сведения по существующим системам накопления электроэнергии.

**Ключевые слова:** электромобиль, аккумулятор, коэффициент полезного действия, энергия, парниковые газы.

Источником всех видов энергии на Земле в конечном итоге является электромагнитное излучение Солнца. Естественным средством концентрации рассеянной энергии является процесс превращения ее во внутреннюю энергию вещества, происходящий в растениях.



Рис. 1. Распределение источников энергии в мире [1]

Этому процессу мы обязаны всеми запасами горючего на земле: угля, нефти и газа, которые удовлетворяют почти девяносто процентов энергетических потребностей человечества (рис. 1).

В свое время изобретение двигателя внутреннего сгорания придало невиданный толчок освоению и использованию нефти. Сегодня монополия невозобновляемых источников энергии стремительно разрушается. Автомобиль с двигателем внутреннего сгорания отличается

высокая степень автономии (пробег без дозаправки), что обусловлено высокой плотностью энергии, заключенной в жидком топливе. Максимальные уровни КПД самих двигателей весьма высоки (до 33% у бензиновых и до 40% у дизельных двигателей), но достигаются, к сожалению, только на небольшой части рабочих режимов, практически не используемых в городском цикле движения. Если в начале 1900-х годов электромобиль был доступен только для избранных, то сегодня развитие технологий хранения электроэнергии обуславливает широкое распространение электротранспорта. Однако ключевым элементом до сих пор остается аккумуляторная батарея, накапливающая электроэнергию из энергосети или от бортового генератора.

Субкомпактный электромобиль сегодня поставляется с батареей емкостью 12...18 кВт·ч, семейный седан среднего размера имеет 22...32 кВт·ч, а роскошные модели от *Tesla* стоят отдельно с большой батареей 60...90 кВт·ч, чтобы обеспечить расширенный диапазон движения и высокую энергетичность. Требования к аккумуляторам очевидны: плотность энергии (емкость) на единицу массы, измеряемая в Вт·ч/кг, срок службы, саморазряд, число перезарядок (табл. 1).

**Таблица 1.**  
**Характеристики электрических аккумуляторов [2]**

	никель-кадмиевые	никель-металл-гидридные	свинцово-кислотные	литий-ион кадмий	литий-ион марганец	литий-ион фосфат
плотность энергии, Вт*ч/кг	45...80	60...120	30...50	150...250	100...135	90...120
внутреннее сопротивление, МОм	100...200 <sup>1</sup> 6 В батарея	200...300 <sup>1</sup> 6 В батарея	<100 <sup>1</sup> 12 В батарея	100...130 <sup>1</sup> элемент	25...75 <sup>2</sup> элемент	25...50 <sup>2</sup> элемент
число перезарядов (разряд до 20% емкости)	1500 <sup>2</sup>	300...500 <sup>3,4</sup>	200...300 <sup>3</sup>	300...500 <sup>3</sup>	>300...500 <sup>4</sup>	>1000 лаб условия
время быстрого заряда	1 ч типично	2...4 ч	8...16 ч	1,5...3 ч	1 ч или меньше	1 ч или меньше
стойкость к перезаряду	средняя	низкая	высокая	низкая, не переносят компенсационной зарядки		
саморазряд/мес комнатная температура	20% <sup>5</sup>	30% <sup>5</sup>	5%	<10% <sup>6</sup>		
напряжение элемента, В номинал среднее	1,25 <sup>7</sup>	1,25 <sup>7</sup>	2,0	3,6 3,7 <sup>8</sup>	3,6 3,8 <sup>8</sup>	3,3
ток заряда пиковый предпочтительно	20С 1С	5С <0,5С	5С <sup>9</sup> 0,2С	<3С <1С	>30С <10С	>30С <10С
диапазон температур <sup>10</sup> , °С только разряд	-40...60	-20...60	-20...60	-20...60		
обслуживание	30...60 дней	60...90 дней	3...6 <sup>11</sup> месяцев	не требуется		
безопасность	термически стабильна, рекоменд. предохранитель	термически стабильна, рекоменд. предохранитель	термически стабильна	обязательно защитные цепи, стабильна до 150°С	рекомендуются защитные цепи, стабильна до 250°С	рекомендуются защитные цепи, стабильна до 250°С
токсичность	высоко токсична	относительно низкая токсичность	опасна для окр. среды	низкая токсичность, в небольших количествах может быть утилизирована		

## Окончание табл. 1.

- 1) внутреннее сопротивление батареи зависит от емкости, типа, числа элементов.
- 2) определено для аккумуляторов типа 18650. Размер аккумулятора и конструкция определяют внутреннее сопротивление: большие аккумуляторы могут иметь сопротивление менее 15 мОм.
- 3) количество перезарядов определяется регулярностью обслуживания аккумулятора. Невыполнение периодических разрядных циклов может снижать количество перезарядов втрое.
- 4) количество перезарядов зависит от степени разряда. Мелкие разряды обеспечивают большее число циклов перезаряда.
- 5) саморазряд максимален сразу же после заряда и затем уменьшается. Потери емкости никель-кадмиевого аккумулятора составляют 10% в первые 24 часа, затем падают до 10% каждые 30 дней. Высокие температуры повышают саморазряд.
- 6) внутренние цепи защиты аккумулятора обычно отбирают 3% запасенной энергии за месяц.
- 7) традиционно номинальное напряжение составляет 1,25 В; 1,2 В чаще встречается для согласования с литий-ионными аккумуляторами (3 последовательно = 3,6V).
- 8) напряжение литий-ионных аккумуляторов часто представляют выше, чем номинальные 3,6 В. Это основано на среднем напряжении под нагрузкой.
- 9) пригодны к высоким токам в импульсе, требуют время на рекуперацию.
- 10) применимо только к разряду; температурный диапазон при заряде более щадящий.
- 11) обслуживание может быть в форме «выравнивающего» или 'topping' для предотвращения сульфатации.

Аккумуляторная батарея может быть сконструирована малых размеров и большого срока службы, но иметь ограниченное число перезарядок. Другая батарея может иметь долговечность и при этом быть большой по габаритам. Третья может быть выполнена с высокой плотностью энергии, долгим сроком службы, но в специальном исполнении и очень дорогой для обычного применения.

В автомобильном применении в свое время использовались свинцово-кислотные, никель-металлгидридные, литий-ионные аккумуляторы. Так на последних выпусках известных *GM EV-1*, стояли никель-металлгидридные батареи с напряжением 343 В, емкостью 77 А\*ч (95 МДж). Производители сегодняшних *Nissan Leaf*, *BMW i3* и других используют проверенную литий-марганцевую технологию с призматическими элементами с «начинкой» из никеля, марганца и кобальта (*NMC*). *Tesla*, напротив, использует цилиндрические элементы типа 18650 на базе никель, кобальт, алюминий (*NCA*) (табл. 2). Что касается пробегов, то для чистых электромобилей малый пробег, обусловленный малой емкостью аккумуляторов, остается главным препятствием на пути их распространения.

Таблица 2.  
Ключевые параметры электромобилей

Марка	Батарея, кВт*ч	Пробег, км	Расход, Вт*ч/км
BMW i3	22	135	165
GM Spark	21	120	175
Fiat 500e	24	135	180
Honda Fit	20	112	180
Nissan Leaf	30	160	190
Mitsubishi MiEV	16	85	190
Ford Focus	23	110	200
Smart ED	16.5	90	200
Mercedes B	28 (31.5)*	136	205
Tesla S 60	60	275	220
Tesla S 85	90	360	240

\* пробег ограничен 28 кВт\*ч, но установлен ручной переключатель до 31,5 кВт\*ч, что дает дополнительно 16 км пробега.

Следует пояснить успех фирмы *Tesla*, сумевшей создать автомобиль с прекрасной динамикой, управляемостью, огромным диапазоном и заявленной долговечностью. Эксперты

признают, что дело в обычном «переразмеривании» компонентов. По сравнению с другими электромобилями *Tesla* увеличила емкость батареи в 3-4 раза. Очень грамотно разместив примерно 7000 элементов типа 18650 они смогли не только запастись значительную энергию в 3,4 А·ч на элемент (250 Вт·ч/кг), но и существенно опустить центр тяжести автомобиля (рис. 2).



**Рис. 2.** Размещение аккумуляторов на платформе электромобиля *Tesla*

Кроме того, переразмеривание позволило снизить нагрузку на каждый элемент, тем самым повысив их долговечность. Использование одного из самых распространенных в мире элементов (по размерам чуть больше батарейки АА, в 2013 в мире выпущено 2,5 млрд элементов типа 18650) позволило снизить стоимость батареи. Исключительно для покрытия всего диапазона режимов был выбран очень мощный электродвигатель, придавший автомобилю отличную динамику. Однако, автомобиль получился самым тяжелым из всех (одна батарея весит 540 кг), что повысило расход энергии на движение.

Заявленная емкость батареи может ввести в заблуждение. Дело в том, что используется примерно половина емкости для увеличения срока службы (заряд батареи допускается до 80% емкости, а разряд до 30%). Обычно это скрыто от потребителя для «умной» компенсации деградации батареи. Старение снижает емкость, и для обеспечения того же пробега система управления батареей (*BMS*) постепенно снижает уровень допустимого разряда (до 10%) и повышает уровень заряда (до 100%), выкачивая из изношенной батареи примерно такое же количество электроэнергии как раньше. Естественно, это повышает нагрузку на нее и необратимо снижает срок службы.

Как обычно, следует аккуратно относиться к приведенным официальным данным. Они получены в идеализированных условиях теплого климата и равномерного движения. В реальной эксплуатации пробеги обязательно сокращаются. Причиной могут стать повышенная электрическая нагрузка от таких потребителей, как фары, стеклоочистители или, значительно в большей степени, обогрев или кондиционирование салона. Агрессивное вождение особенно в холмистой местности сокращают пробег еще больше. Для владельцев электромобилей устраиваются обучающие тренинги, вебинары, в которых даются рекомендации экономичного вождения. Основные – плавные разгоны и минимизация отопления (зимой) или кондиционирования салона (летом). Также рассматриваются прогрев салона от зарядной розетки до момента выезда из гаража. По замерам фирмы *Volvo*, при температуре 0°C или немного ниже (!) потери в пробеге составляют 30...40% (нагрев батареи и/или салона). Вероятно, по этой причине, на электромобили *Volvo C30 EV* устанавливаются обогреватели, работающие на этаноле [3], а на Газель «*NEXT Electro*» установлен обогреватель на дизельном топливе.

Кроме повышенной нагрузки, холодная эксплуатация снижает емкость батарей. Сложности с зарядом батарей на холоде обычно ускользают от внимания владельцев элект-

тромобилей. Большинство литиевых аккумуляторов не могут заряжаться при отрицательных температурах. Для их защиты в некоторых конструкциях предусмотрены подогреваемые «одеяла» для согрева батарей при заряде. *BMS* может также снижать зарядный ток. Быстрая зарядка в этих условиях провоцирует в литий-ионных аккумуляторах образование дендритов. Большая часть заправок вообще осуществляется владельцами в ночное время у своего частного дома; лишь небольшая часть использует общественные зарядные станции. По возможности не следует превышать скорость заряда более 1 С, т.е. зарядный ток в амперах не должен превышать величины емкости батареи в ампер-часах. В настоящее время известны решения супербыстрой зарядки, позволяющие закачать около 80% электроэнергии за 30 минут. Однако пользоваться ими следует лишь эпизодически, поскольку большие зарядные токи представляют огромную нагрузку на аккумулятор и снижают его долговечность. Некоторые производители записывают в память блока управления количество случаев «грубого» заряда и могут аннулировать гарантию на батарею в случае превышения. Сегодня большинство производителей электромобилей гарантируют 8 лет службы или 160 000 км пробега. Такая сложная задача решается, например, тем, что батарея при покупке автомобиля не продается, а сдается в лизинг. В этом случае владелец ни при каких условиях не сможет заявить о возможных дефектах аккумуляторов.

Для расчета величины среднего КПД силовой установки можно воспользоваться следующим приближением. Для конкретного автомобиля с традиционным ДВС известен средний расход топлива в городе. Естественно, величина не фиксированная и во многом зависящая от режима движения, погоды, технического состояния... Примем расход топлива некоего легкового автомобиля с бензиновым двигателем 8л/100 км. Средняя скорость движения в Нижнем Новгороде примерно 25 км/ч, что соответствует расходу 2 л/ч. Это реальная обстановка определяемая сегодняшней ситуацией. Даже если других машин на дороге нет, для сохранения объективности наш эталонный автомобиль должен двигаться равномерно без остановок со скоростью 25 км/час. Мощность необходимая для равномерного движения автомобиля с такой скоростью – 3 кВт. За час движения будет пройдено 25 км, сожжено 2 л бензина (66 МДж) и совершена работа 3 кВт·ч (10,8 МДж). КПД процесса весьма невелик – 16,4%. Именно этот факт наряду с общим ростом числа автомобилей вызывает озабоченность значительным расходом невозобновляемых энергетических ресурсов и загрязнением атмосферы. При таком расходе топлива выброс углекислого газа  $\text{CO}_2$  в атмосферу при движении составит около 160 г/км. По аналогии с предыдущим примером для ДВС, примем средний расход энергии некоего легкового электромобиля в городе 200 Вт·ч/км. При средней скорости движения 25 км/ч это соответствует расходу 5 кВт·ч (18 МДж) за час движения. Непосредственно на движение автомобиля потребна мощность 3 кВт, что выливается в 3 кВт·ч (10,8 МДж) энергии. КПД движения – 60%. Прекрасно. Но следует понизить данную величину примерно на 10%, чтобы учесть еще КПД зарядной станции, неважно бытовой или общественной, поскольку платить придется за энергию, взятую из сети, а не закачанную в аккумуляторы. Окончательный КПД – 54%.

Перенесем электромобиль в обстановку, приближенную к российской. Прежде всего, отличия будут наблюдаться в температуре окружающего воздуха. Считаем, что отопитель салона включен всегда, что типично для большей части сезонов. Средняя мощность отопителя для обогрева салона около 3 кВт. Примерно столько же, сколько было потрачено для движения в приведенном выше примере. Повторяя расчет, получим, что при той же скорости, времени и т.д. совершенная работа за час 21,6 МДж. Дополнительные 10,8 МДж (3 кВт·ч) энергии придется забрать от аккумулятора. КПД силовой установки останется тем же, а количество затраченной энергии на километр увеличится вдвое и пробег сократится вдвое. Общий КПД упадет до 27%. Для бензинового автомобиля затраченное количество топлива не изменится. На отопление салона энергия берется от «бросового» тепла системы охлаждения. Можно сказать, что КПД в целом, точнее степень использования топлива, повышается до 32,8%.

Многokратное преобразование энергии из одной формы в другую сопровождается значительными потерями. В электрических гибридах таких преобразований на каждом цикле совершается несколько. Потери в генераторе при рекуперации энергии торможения, потери в преобразователях тока и напряжений, необходимых для согласования генератора и аккумуляторов, потери в аккумуляторе при заряде, потери в проводах, обмотках... Весь комплекс потерь повторяется при обратной передаче энергии от аккумуляторов к колесам. Чем выше ускорения (замедления) автомобиля, т.е. больше величины тока, снимаемого и подаваемого на аккумуляторы, тем ниже КПД заряда-разряда. Типичное замедление автомобиля массой 1400 кг в городском потоке равно  $1,5...2,0 \text{ м/с}^2$ , мощность торможения –  $25...30 \text{ кВт}$ . При этом допускаемая мощность зарядки стандартной аккумуляторной батареи автомобиля *Toyota Prius* около  $20 \text{ кВт}$  (при степени заряженности 50%), а разряда –  $14,5 \text{ кВт}$  [4].

Таким образом, экологическая чистота электромобилей может быть поставлена под сомнение. При производстве электроэнергии на угольных тепловых электростанциях выброс  $\text{CO}_2$  составляет около  $1080 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ . Есть электростанции, работающие на природном газе, выброс  $\text{CO}_2$  у них примерно  $640 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ . Есть атомные или ветряные электростанции с нулевым выбросом  $\text{CO}_2$ . На рисунке 3 представлена динамика производства электроэнергии для 28 стран Евросоюза с разбивкой по виду используемого топлива. Средний по ЕС выброс углекислого газа в 2015 году составил около  $300 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ . Средний КПД тепловых электростанций – 35%.

Для России в производстве электроэнергии доминируют тепловые электростанции – 68% выработки, на втором месте атомные – 17%, на третьем ГЭС – 15%. Электростанций, работающих на возобновляемых источниках, у нас нет. Среди ТЭС доля работающих на природном газе 71%, на угле 27%, остальные на мазуте. Средний выброс углекислого газа составляет около  $400 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ .

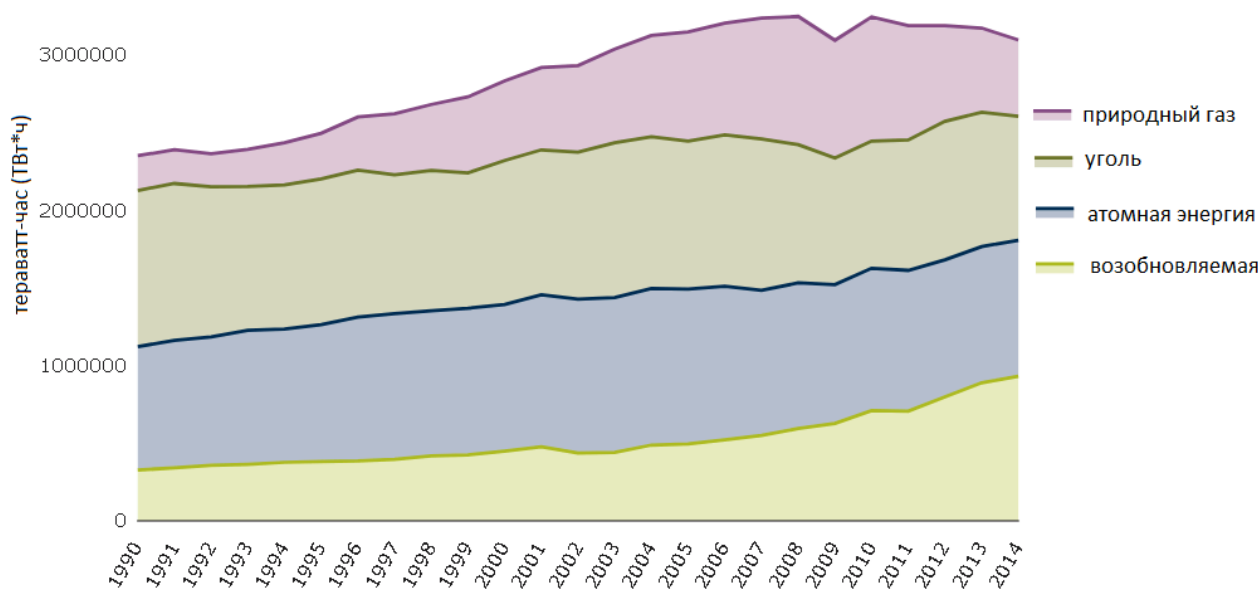
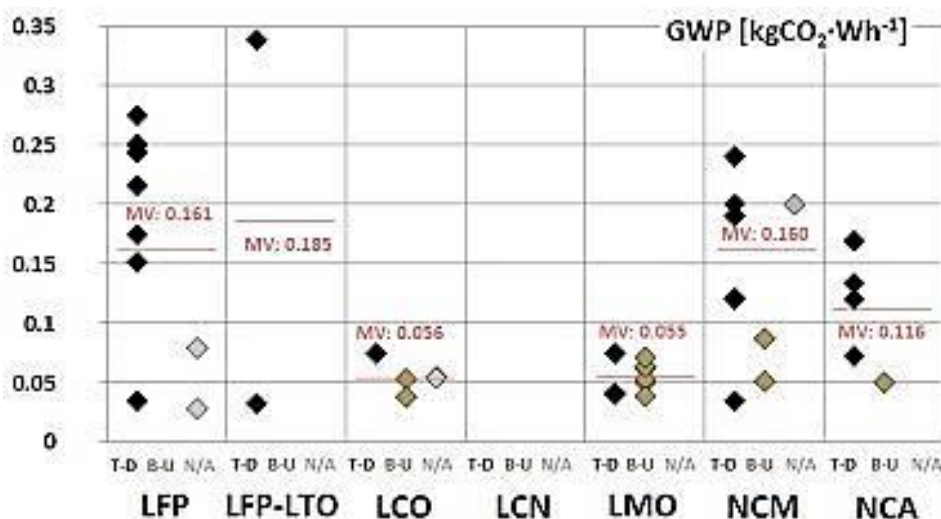


Рис. 3. Распределение электроэнергии по источникам (Европейский союз, 28 стран)

Ежегодный пробег легкового автомобиля в среднем по Европе 15 000 км. При среднем сроке службы электромобиля 7 лет, что признано официально, пробег составит около 100000 км. Средний расход электроэнергии определенный по результатам реальной эксплуатации составляет около  $200 \text{ Вт}\cdot\text{ч/км}$ . С учетом КПД зарядной станции –  $0,22 \text{ кВт}\cdot\text{ч/км}$ . Окончательно за весь срок эксплуатации электромобиля в Европе будет истрчено  $22000 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  электричества и выброшено в атмосферу  $6600 \text{ кг CO}_2$ , по  $66 \text{ г/км}$ .

Учтем, что, например, упомянутый выше *GM EV-1* – это двухместный электромобиль с аэродинамическим коэффициентом  $C_x = 0,19$  в багажник которого можно «легко поместить комплект клюшек для гольфа» [5]. Поэтому для сравнения мы и взяли небольшой легковой автомобиль с бензиновым двигателем с выбросом  $\text{CO}_2$  около 160 г/км. При пробеге 100000 км им будет выброшено в атмосферу 16000 кг  $\text{CO}_2$ . На производство самого бензина, его доставку до заправочного пистолета также затрачивается энергия и выбрасывается некоторое количество углекислого газа. В среднем 60 г $\text{CO}_2$ /кВт·ч или 560 г $\text{CO}_2$ /л. Наш автомобиль сжигает по 8 л/100 км, что выливается в потребность 8000 л бензина за весь срок и приведет к образованию 4500 кг  $\text{CO}_2$  или 45 г/км.

При производстве самого автомобиля, его экипажной части, энергия затрачивается на производство материалов, механическую обработку, сборку, отопление цехов. Суммарный выброс  $\text{CO}_2$  с учетом общего пробега можно выразить примерно в 30 г $\text{CO}_2$ /км. Чем проще конструкция, чем более технологичны примененные материалы (например, кузов из стали по сравнению с алюминиевыми сплавами) тем меньше затраты энергии на производство и меньше выбросы  $\text{CO}_2$ . Для автомобиля с бензиновым двигателем, и с электроприводом эти затраты очень близки. В то же время производство аккумуляторных батарей намного выходит за рамки по энергопотреблению. Добыча исходного сырья, транспортировка в регионы, где будет происходить переработка, изготовление химически чистых материалов (литий, никель, кобальт), изготовление и сборка батарей требуют значительных затрат [6] (рис. 4).



**Рис. 4. Выбросы  $\text{CO}_2$  при производстве аккумуляторов разных типов:**  
**LFP** – литий-ион фосфат, **LFP-LTO** – литий-ион фосфат – литий титан-оксид,  
**LCO** – литий кобальт-оксид, **LMO** – литий марганец-оксид,  
**NCM** – никель-кобальт-марганец, **NCA** – никель-кобальт-алюминий

Для аккумуляторов типа *NCM*, используемых, в частности, на Газель «*NEXT Electro*», выброс  $\text{CO}_2$  составит по разным оценкам в среднем 160 г $\text{CO}_2$ /Вт·ч, что при суммарной емкости 46 кВт·ч выливается в 7360 кг  $\text{CO}_2$ , или 74 г/км. Для *Tesla* – 108 г/км.

Суммирование (табл. 3) показывает, что для электромобиля с современным уровнем технологий выброс основного парникового газа  $\text{CO}_2$  составит 170 г/км. Для автомобиля с бензиновым двигателем – 235 г/км. При понижении или повышении температуры окружающего воздуха относительно комфортной зоны 15...25°C выбросы  $\text{CO}_2$  электромобилем возрастут в полтора раза из-за затрат на обогрев или кондиционирование.

**Таблица 3.**  
**Суммарные выбросы CO<sub>2</sub> за срок службы автомобиля**

Выброс CO <sub>2</sub> , г/км	Автомобиль с ДВС	Электромобиль	
		лето	зима
Производство энергии	45	66	132
Производство авто	30	30	30
Производство батарей	-	74	74
Движение	160	-	-
<b>Сумма</b>	<b>235</b>	<b>170</b>	<b>236</b>

Тем не менее, производители электромобилей весьма агрессивно ведут наступление на рынок: ищут иные способы накопления электроэнергии, проектируют станции быстрой зарядки, обещают получение электроэнергии только из возобновляемых источников, чтобы спасти экологическую обстановку не только в столицах, но и в провинции. Со своей стороны, сторонники традиционной энергетики могли бы взять для сравнения не простую Ладу Гранту, а, например, *Skoda Octavia G-tec*, работающую на природном газе (за ее приобретение взамен старого дизельного автомобиля в Германии выплачивается субсидия в 7000 евро) с выбросом CO<sub>2</sub> в движении всего 98 г/км [7]. Отказываться от электромобиля, конечно, не следует. У него есть неоспоримые преимущества, недостижимые для обычных ДВС – малозумность, например. Однако реальные, с технической точки зрения, шаги сегодня можно видеть только в следующем: появление *range extenders* (увеличители пробега электромобиля в виде теплового двигателя с генератором на борту) и крупных грузовиков с токоъемниками для питания электроэнергией от контактной сети над автомагистралями, способных на своих аккумуляторах преодолевать лишь небольшое расстояние. И не имеет значения, что экстендеры позволяют проехать 400 км, а основные батареи только 40, а магистралей с контактной сетью еще нет.

#### *Библиографический список*

1. Statistical Review of World Energy [Электронный ресурс] // Режим доступа: [www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html](http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html) (Дата обращения 29.01.2018).
2. Battery University [Электронный ресурс] // Режим доступа: [www.batteryuniversity.com](http://www.batteryuniversity.com) (Дата обращения 29.01.2018).
3. Electric Cars [Электронный ресурс] // Режим доступа: [www.allcarselectric.com](http://www.allcarselectric.com) (Дата обращения 29.01.2018).
4. Zolot, M. Thermal Evaluation of Toyota Prius Battery Pack / Matthew Zolot, Ahmad A. Pesaran, Mark Mihalic // 17th Annual Battery Conference on Applications and Advances, Long Beach, CA, January 2002 [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://ru.scribd.com/document/206901238/Prius-Test-Battery-Pack> (дата обращения: 29.01.2018).
5. GREENCAR.COM [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.greencar.com> (Дата обращения: 29.01.2018).
6. Messagie, M. Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles / Dr. Maarten Messagie // Transport & Environment. [Электронный ресурс] // Режим доступа: [www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/TE%20-20draft%20report%20v04.pdf](http://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/TE%20-20draft%20report%20v04.pdf) (Дата обращения 29.01.2018).
7. GAZEOP.PL [Электронный ресурс] // Режим доступа: [www. http://gazeo.pl/](http://gazeo.pl/) (Дата обращения 29.01.2018).