

Проблемы конкурентоспособности новых технологий в легковом автотранспорте (ДВС-Электромобиль- Водородный автомобиль с топливным элементом)

Синяк Ю.В., д.э.н., г.н.с. (ИНП РАН)

Оглавление

1. Место транспорта в мировой экономике и энергетике	2
2. Метод оценки экономической эффективности инновационных технологий в транспорте	4
3. Исходные данные для расчета эффективности работы транспортных средств	10
3.1. Стоимость энергоносителей	10
3.2. Прогнозные оценки стоимости новых типов автомобилей среднего класса (вес 1200-1500 кг).....	15
3.2.1. Двигатель внутреннего сгорания (ДВС)	15
3.2.2. Электромобили.....	21
3.2.3. Водородный автомобиль с топливным элементом	31
3.3. Оценка ущерба для здоровья людей и окружающей среды от загрязнения атмосферы выбросами автотранспорта.....	38
3.4. Дополнительные параметры, учитываемые при сопоставлении альтернативных технологий	41
4. Расчет выбросов в атмосферу сравниваемых типов автотранспорта.....	42
4.1. Модель GREET.....	42
4.2. Расчет выбросов загрязнителей при использовании транспортных технологий	44
5. Оценка эффективности сравниваемых транспортных средств	63
5.1. ДВС.....	63
5.2. Электромобиль	65
5.3. Водородный автомобиль с топливным элементом	65
6. Выводы	72

1. Место транспорта в мировой экономике и энергетике

Транспорт является важнейшим элементом мировой экономической системы. В основе развития транспорт лежит принцип мобильности - людей, товаров, информации, идей и т.п. Мобильность - одна из самых фундаментальных и важных характеристик экономической или социальной активности, поскольку она удовлетворяет основную потребность общества переходить (перемещаться) из одного места в другое. Эффективность мобильности определяется концентрациями перемещаемых потоков, скоростями их прохождения по каналам связи, надежностью связей и удобствами перемещения в цепи от источника до потребителя. Практическая реализация мобильности осуществляется через системы транспортных связей, включающих технические средства и соответствующие объекты транспортной инфраструктуры. Экономики, которые обладают большей мобильностью, часто имеют более благоприятные возможности для своего развития, чем те, у кого мобильность реализована слабо или имеет низкую степень регулярности. Снижение мобильности препятствует развитию экономических и социальных систем, а состояние мобильности становится важным катализатором экономического развития. Таким образом, мобильность является одним из факторов развития и совершенствования экономических систем.

В развитых странах на транспорт приходится более десяти процентов экономической активности.¹ Этот величина включает расходы на личный транспорт, а также покрытие затрат на массовые перевозки грузов. Доля транспорта в расходах на экономическую деятельность многих стран достигает 40-60% от валового внутреннего продукта (ВВП). Доходы глобальной транспортной отрасли достигли 1,6 трлн. долл. в 2015 году.² В транспортной отрасли задействовано около 10 млн. чел., что составляет около 5% всех занятых. Современные транспортные системы имеют основополагающее значение для конкурентоспособности бизнес-компаний на мировых рынках. Затраты на логистику (транспорт и хранение сырья и продукции) достигают 10-15% от стоимости готовой продукции на европейском рынке.

Качество транспортных услуг оказывает большое влияние на уровень жизни людей. В среднем 13,2% бюджета домашних хозяйств

¹Kauppil J. Ten stylized facts about household spending on transport. Statistical Paper 2010-3, September 2010, ITF Paris.,

² Total general government expenditure on economic affairs, 2016 (% GDP % of total expenditure).png (<http://ec.europa.eu/statistics-explained/index.php?title=File>).

тратится на оплату транспорта товаров и услуг. Транспортные услуги являются фундаментальным аспектом развитой экономики, поэтому производительность и транспортная активность, как правило, растут с развитием экономики.

Значительная часть транспортной работы приходится на пассажирский транспорт, где основную роль играют "дорожные" виды транспорта (road-transportation) (без мотоциклов), на долю которых приходится около 2/3 от всех типов пассажирского транспорта.³ Суммарное потребление конечной энергии в целом по миру составило 9384 млн. т н.э. (2015 г.), в том числе около 29% было израсходовано на нужды транспорта. Около 92% потребления энергии всеми видами транспорта приходилось на жидкое топливо (бензин, дизельное топливо, авиакеросин и пр.).⁴ Наиболее крупным потребителем энергии в транспортном секторе являются пассажирские перевозки, на долю которых приходится почти 2/3 энергопотребления в транспорте.⁵

В пассажирских перевозках преобладают легковые автомобили, которые потребляют более 71% энергоресурсов в пассажирском сегменте (или 63% от суммарного потребления энергии в транспорте). Важно отметить, что около 74% потребления энергии транспортом приходится на дорожный транспорт, где сегодня преобладают двигатели внутреннего сгорания (ДВС).

Между тем, непосредственный расход энергии в двигателях транспортных средств составляет только 66% от полного расхода энергии дорожным транспортом. Дополнительные расходы связаны с содержанием и изготовлением транспортных средств, в том числе 5% приходится на содержание и производство автомобилей, 7% - на создание инфраструктуры, 5% - на производство сырья и материалов для автотранспорта и 17% - на производство энергоносителей.⁶

В свете рассмотренных соотношений в объемах работы различных видов транспорта и расходов энергии наибольший интерес вызывают проблемы совершенствования технологий легкового автомобильного транспорта.

³См. International Transport Forum, ITF Transport Outlook 2017.

⁴Рассчитано по *Keyworld energystatistics*, IEA, 2017.

⁵ US EIA (Energy Information Administration), Information Transportation Energy Demand Departments (TEDO-2015) model estimates

⁶Поданным J.-P. Rodrigue, C. Comtois and B. Slack, *The Geography of Transport Systems*, 4th Edition, Routledge, July 2009.

2. Метод оценки экономической эффективности инновационных технологий в транспорте

На ранних стадиях научно-технического развития преобладали способы оценки технологий на основе частных параметров – производительность оборудования, температура процесса и давление, КПД и т.п. Развитие рыночных отношений поставили на первый план стоимостные параметры технологии, одним из которых является стоимость единицы продукции (услуг), производимых конкретной технологией. В современных условиях нельзя не учитывать влияние технологии на здоровье людей и окружающую среду. В основе таких расчетов лежит хорошо известная методика обоснования инвестиционных проектов.⁷

Существует большая группа задач, когда необходимо сделать укрупненный выбор стратегических направлений в использовании новых технологий с целью оценки значимости и привлекательности технологии в условиях обозримой перспективы. В таких задачах известны только укрупненные параметры технологий и гипотезы (допущения) движения цен на продукцию и энергоносители, обобщенные оценки влияния загрязнения окружающей среды. В этих случаях вполне допустимо использование упрощенного метода оценки экономической эффективности инвестиционных проектов, основанного на значениях *расширенных приведенных затрат*.

В последние 10-15 лет подходы к оценке эффективности новых технологий были существенно дополнены за счет включения в анализ эффектов влияния загрязнителей окружающей среды на экономичность технологий. Это потребовало внесение ряда уточнений в процедуры, применяемые при обосновании новых технологий.

Во-первых, в условиях динамичности ряда факторов (например, цены на энергоносители, стоимость рабочей силы и т.п.) оказалось целесообразным относить показатель затрат не к одному году, а ко всему сроку службы технологии (*жизненный цикл технологии*). Появился целый раздел анализа новых технологий, получивший название Life-Cycle Analysis. Особенно широко этот метод применяется в зарубежной практике для оценки новых энергетических технологий (см., например, работы⁸).

⁷Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. Официальное издание. М., 1994.

⁸Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. [Life Cycle Engineering Guidelines](#). EPA/600/R-01-101, 2001; Jensen, A.A., et al. Life Cycle Assessment (LCA): A guide to approaches, experiences and information sources. Report to the European

Во-вторых, в ряде случаев интерес представляет сравнение отдельных интегральных показателей технологий (например, совокупный расход энергии, выбросов отдельных загрязнителей в окружающую среду, занятости и т.п.) по этапам трансформации энергии от добычи топлива до его конечного использования (*топливный цикл*). Такие интегральные показатели позволяют осветить отдельные сопутствующие аспекты, связанные с внедрением технологии.

В-третьих, охват интегрального показателя может быть расширен путем включения в него затрат на стадии производства оборудования для сравниваемых технологий (*сопутствующие расходы энергии и выбросы в процессе изготовления оборудования для технологии*).

В-четвертых, как известно, рыночные механизмы хорошо работают в условиях «продавец-покупатель», но не учитывают косвенных эффектов, которые при этом проявляются у третьих лиц. Это обстоятельство может быть проиллюстрировано ситуациями в энергетике, когда использование энергоносителя в технологическом процессе сопровождается выбросами загрязнителей в окружающую среду. Загрязнители действуют негативно на растительность и животный мир, строительные конструкции, здоровье людей. Все это приводит к ущербам, которые никак не отражаются в расчетах экономической эффективности. Поэтому было предложено проводить стоимостную оценку этих ущербов и относить их к затратам по использованию энергоносителей. Поскольку органические виды топлива, ядерная энергия и возобновляемые источники энергии имеют принципиально различный состав загрязнителей, то и ущербы, возникающие при их использовании, будут отличаться в пользу более чистых источников энергии. В результате выводы о выборе рационального энергоносителя для технологических процессов принимают более обоснованный характер за счет дополнительного учета экономических и социальных факторов (*социальная стоимость энергии*). Метод расчета социальной стоимости энергии позволяет оценить полезность энергоносителя с общественной точки зрения. Он является технолого- и территориально-ориентированным, так как получаемые результаты имеют привязку к определенным технологиям и территориям. Поэтому для тех же рыночных условий социальная стоимость энергии может принимать различные значения, увеличиваясь для территорий с большим количеством дорогостоящих реципиентов (например, в городах с большой плотностью населения социальная стоимость энергии будет намного выше, чем в сельской местности, где плотность населения

существенно ниже). Описание методологии и примеров расчета показателей социальной стоимости энергии можно найти в работах⁹.

К сожалению, в России эти подходы даже в научных кругах плохо известны и почти не применяются.

Исходным условием корректного сопоставления технологий является их приведение к сопоставимому виду. К основным показателям сопоставимости относятся:

- производительность оборудования;
- качество продукции;
- санитарно-гигиенические условия и безопасность труда;
- загрязненность окружающей среды;
- уровень цен и тарифов при исчислении всех технико-экономических показателей и один и тот же нормативный коэффициент эффективности капиталовложений.

В том случае, если условие сопоставимости обеспечить невозможно, то следует учитывать дополнительные затраты на приведение конкурирующих вариантов топливо- и энергоиспользования к сопоставимому виду или соответствующие ущербы, если такое приведение осуществить принципиально не удастся.

В общем виде оценка интегральных социальных затрат при обосновании новых энергетических технологий может быть представлена в виде выражения:

$$Z = Z_{эн} + Z_{нэ} + Z_{эк},$$

где $Z_{эн}$ – энергетические затраты по использованию технологии; $Z_{нэ}$ – неэнергетические затраты (амортизация, рабочая сила, накладные расходы и т.п.; $Z_{эк}$ – интегральные ущербы от загрязнения окружающей среды и для здоровья людей по всей цепи топливного цикла и производства оборудования.

⁹ExternE. Externalities of Energy, European Commission, Directorate General XII, Science, Research and Development, Luxembourg, 1995; Voss, A., LCA and External Costs in Comparative Assessment of Electricity Chains/ Decision Support for Sustainable Electricity Provision, in "Externalities and Energy Policy. The Life Cycle Analysis Approach", Workshop Proceedings, Paris, 15-16 Nov. 2001, OECD; External Costs. Research Results on Socio-Environmental Damages due to Electricity and Transport, European Commission, EUR 20198, 2003; OECD, Nuclear Energy Agency. Externalities and Energy Policy. The Life Cycle Analysis Approach, Workshop Proc., Paris, France, 2001.

Энергетические затраты. В качестве показателя использования энергоносителя используется его удельный расход. При оценке энергетической составляющей необходимо различать удельные расходы топлива и энергии для действующих, проектируемых и намечаемых к сооружению на более отдаленную перспективу объектов.

Для действующих предприятий удельные расходы топлива и энергии определяются на основе прогрессивных нормативов с учетом конкретных условий производства, а для проектируемых – по наиболее прогрессивным конструкциям оборудования, компоновочным схемам и технологическим режимам, исходя из обобщения имеющихся передовых решений проектных и научно-исследовательских организаций и зарубежный опыт. Интегральные оценки определяются за срок жизненного цикла технологии (t):

$$Z_{\text{эн}} = \sum_t C_{\text{энт}} \cdot B_{\text{энт}},$$

где $C_{\text{энт}}$ – цена энергоносителя в период t ; $B_{\text{энт}}$ – расход энергоносителя на получение полезного эффекта от технологии.

Неэнергетические затраты включают:

- материалы, используемые в процессе, и энергия для вспомогательных нужд (электроэнергия, теплота, сжатый воздух и пр.);
- заработная плата;
- амортизация основного и вспомогательного оборудования,
- расходы на текущие ремонты оборудования;
- общепроизводственные расходы, определяемые по соответствующим нормативам;
- расходы на доведение качества (или ожидаемые потери качества если продукция, получаемая при использовании различных энергоносителей, имеет разное качество) и объема выпуска продукции до сопоставимого вида;
- расходы, связанные с обеспечением требуемых санитарно-гигиенических условий труда;
- страхование;
- расходы по охране окружающей среды.

В наиболее простом случае допустимо определять неэнергетические затраты как долю от капитальных затрат:

$$Z_{\text{нэ}} = \sum_t (\alpha_t + \beta_t + E_{\text{нт}}) \cdot K,$$

где α_t – прочие затраты (заработная плата, обслуживание, страховые отчисления и т.п.) как доля капиталовложений; β_t – норматив амортизационных отчислений; $E_{нт}$ – норма прибыли на капитал; K – капиталовложения в объект.

В состав капиталовложений (K) включаются:

- затраты на создание основных производственных фондов объекта – изготовление, транспортировку, монтаж оборудования, строительство зданий и сооружений, где это оборудование устанавливается. Сюда относятся:
 - затраты по сооружению основной установки, в которой протекает технологический процесс (проектирование, монтаж, ограждающие конструкции и т.п.);
 - затраты в установки, необходимые для доведения качества и объемов производства продукции до сопоставимого уровня (наладка и настройка оборудования);
 - затраты в необходимое вспомогательное оборудование (системы электро-, тепло-, водоснабжения и др.);
 - затраты в установки, обеспечивающим требуемые санитарно-гигиенические условия труда и защиту окружающей среды;
 - стоимость земли, на которой сооружается установка;
- затраты на создание оборотных фондов включают стоимости технологических запасов сырья, материалов и полуфабрикатов, необходимых для нормальной работы производства в соответствии с установленным графиком.

При использовании энергоносителей в технологических процессах могут образовываться материальные и энергетические отходы, которые при соответствующем оформлении процесса и организации производства реализуются за пределами рассматриваемой установки (технологии). В таких случаях эти отходы производства при детальном анализе эффективности учитываются как денежные притоки по соответствующим рыночным ценам этих продуктов. В упрощенных оценках эти потоки вычитаются из приведенных затрат по использованию энергоносителей по ценам соответствующей продукции, которую они могут замещать.

Социальные затраты. В упрощенном варианте социальные затраты выражаются через значения ожидаемых интегральных ущербов для окружающей среды и здоровья людей в результате воздействия вредных выбросов, возникающих при работе энергетических объектов. В основе этой составляющей положены учет двух факторов – выбросы загрязнителей окружающей среды и последствия их воздействия на основных реципиентов.

Для более полного учета этого фактора выбросы определяются по трем составляющим:

- собственно технологический объект, расположенный на определенной территории;
- объекты цепи топливного цикла, которые также участвуют в загрязнении окружающей среды на территориях, где расположены объекты топливного цикла;
- выбросы в сопряженных отраслях, обеспечивающих создание объекта (производство оборудования и компонентов):

$$Z_{\text{эк}} = \sum_t \sum_j y_{jt} \cdot (V_{1jt} + V_{2jt} + V_{3jt}),$$

где V_{1jt} – выбросы загрязнителя j в топливном цикле; V_{2jt} – то же, при работе технологии; V_{3jt} – то же, при производстве оборудования для технологии; y_{jt} – стоимость удельного ущерба от загрязнителя j .

В итоге величина затрат, по которой надлежит сопоставлять технологии, принимает значение:

$$Z_y = Z / L,$$

где L – результат работы технологии в течении ее жизненного цикла (t).

Предполагается, что при прочих равных условиях проект, обеспечивающий *минимальный уровень интегральных затрат, гарантирует получение максимальной народнохозяйственной эффективности.*

При оценке экономической эффективности по упрощенным формулам необходимо принимать во внимание степень точности исходных данных. Как правило, погрешность технико-экономических показателей, характеризующих тот или иной энергоноситель, даже полученных на основе проектно-сметных материалов, составляет не менее $\pm 5\%$. Еще меньше точность укрупненных технико-экономических показателей, получаемых на основе аналогов, которые практически не учитывают местные условия сооружения объектов и их эксплуатации. Поэтому, если итоговые показатели по вариантам отличаются друг от друга на величину, меньшую погрешности исходных данных, то эти варианты могут считаться экономически равноценными. В таких случаях предпочтение должно быть отдано варианту технически более совершенному, приводящему к меньшему загрязнению окружающей среды, требующему

меньших затрат труда, более надежному в эксплуатации, с лучшими санитарно-гигиеническими условиями и т.п.

Упрощенный метод оценки применим на стадии прогнозных и предпроектных расчетов, когда невозможно (а часто и не нужно!) точно определить параметры технологического процесса и окружающей обстановки. Он дает ориентировочные оценки эффективности в пределах тех допущений, которые были сделаны лицами, принимающими решения. Для увеличения достоверности выводов, получаемых на основе упрощенных расчетов, целесообразно проводить пост-анализ ожидаемых рисков.

3. Исходные данные для расчета эффективности работы транспортных средств

Предлагаемый метод оценки эффективности технологий применен нами к оценке эффективности легкового автотранспорта. На начальном этапе в качестве показателя эффективности была выбрана *стоимость пробега новых типов транспортных средств, предлагаемых на рынке (например, долл. на 100 км пробега)*.

В качестве основных технологий массового легкового автотранспорта рассматриваются три технологии: автомобиль с двигателем внутреннего сгорания (ДВС), электромобиль и водородный автомобиль с топливным элементом (ТЭ).

Исходя из основных положений изложенной выше методики оценки сравниваемых технологий следует, что экономичность технологии определяется тремя экономическими параметрами:

- стоимость энергоносителя,
- стоимость автомобиля,
- стоимость ущербов от загрязнения выбросами вредных веществ в атмосферу.

Учитывая необходимость использования экономических оценок как в рублевом эквиваленте (для стоимости энергоносителей), так и в долларах (для условных экономических оценок ущербов для окружающей среды), а также смещенных ценовых измерений (для цен на традиционные и новые типы автомобилей) было принято условие отражение всех экономических затрат в пересчете по долларовому эквиваленту на уровне 2019 г.

3.1. Стоимость энергоносителей

С целью придания расчетам большей достоверности было решено на начальном этапе сконцентрировать внимание на центральном регионе Европейской части России. Поэтому в основу показателей были положены укрупненные данные *по Москве и Московской области*, для которых были построены перспективные оценки цен на энергоносители на период до 2040 г. Эти данные приведены в табл. 1.

Таблица 1. Стоимости энергоносителей, принятые в расчетах эффективности транспортных средств

руб. за ед.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2030	2035	2040
	Факт			Расчетная оценка						Прогноз		
Электроэнергия для промышленности (до 670 кВт, ценовая категория 1, напряжение СН-2, без НДС), руб./кВтч	4,02	4,48	4,63	4,79	4,96	5,13	5,31	5,50	5,69	6,65	7,60	7,93
<i>То же с учетом НДС, руб./кВтч</i>	4,75	5,29	5,56	5,75	5,95	6,16	6,38	6,60	6,83	7,98	9,12	9,52
Электроэнергия для населения (Москва и МО), руб./кВтч												
<i>Одноставочный тариф на электроэнергию</i>	5,38	5,38	5,43	5,54	5,65	5,76	5,88	6,00	6,12	6,61	7,10	7,60
<i>Тариф, дифференцированный по 2 зонам суток)</i>												
- пиковая зона	6,19	6,19	6,24	6,36	6,49	6,62	6,75	6,89	7,03	7,59	8,15	8,72
- ночная зона	1,72	1,72	2,21	2,25	2,30	2,35	2,39	2,44	2,49	2,98	3,45	3,93
Уголь, т (натура 5500-6000 ккал/кг), руб./т	3 083	3 497	3 200	3 500	3 600	3 700	3 800	3 900	4 000	4604,21	4988,15	5650,67
Природный газ, руб./1000 м3	5	5	5 399	5	5 727	5	6	6	6 446	7255,9	8068,3	8880,6

	137	319		561		899	076	259		1	0	9
Бензин, Аи-92, руб./л			42	43,9	45,9	47,9	50,1	52,3	54,7	67,52	79,69	91,85
Бензин, Аи-95, руб./л			45	47,0	49,1	51,4	53,7	56,1	58,6	71,44	84,28	97,11
Дизельное топливо, руб./л			42,5	44,4	46,4	48,5	50,7	53,0	55,4	68,3	80,6	93,0
Пропан-бутан для автомобилей, руб./л			22	23,5	24,6	25,7	26,8	28,0	29,3			
Курс рубля к доллару			65,1									

<i>В долл. 2019 г.</i>	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2030	2035	2040
Электроэнергия для промышленности (до 670 Квт, ценовая категория 1, напряжение СН-2, без НДС), долл./кВтч	0,06 2	0,06 9	0,071	0,07 4	0,076	0,07 9	0,08 2	0,08 4	0,087	0,102	0,117	0,122
<i>То же с учетом НДС, долл./кВтч</i>	0,07 3	0,08 1	0,085	0,08 8	0,091	0,09 5	0,09 8	0,10 1	0,105	0,122	0,140	0,146
Электроэнергия для населения (Москва и МО), долл./кВтч												
<i>Однотарифный тариф на</i>	0,08	0,08	0,083	0,08	0,087	0,08	0,09	0,09	0,094	0,101	0,109	0,117

<i>электроэнергию</i>	3	3		5		8	0	2				
<i>Тариф, дифференцированный по 2 зонам суток)</i>												
<i>- пиковая зона</i>	0,09 5	0,09 5	0,096	0,09 8	0,100	0,10 2	0,10 4	0,10 6	0,108	0,117	0,125	0,134
<i>- ночная зона</i>	0,02 6	0,02 6	0,034	0,03 5	0,035	0,03 6	0,03 7	0,03 7	0,038	0,046	0,053	0,060
Уголь, т (натура 5500-6000 ккал/кг), долл./т	47,3 3	53,6 8	49,12	53,7 3	55,26	56,8 0	58,3 3	59,8 7	61,40	70,68	76,57	86,74
Природный газ, долл./1000 м3	78,8 6	81,6 5	82,87	85,3 6	87,92	90,5 6	93,2 7	96,0 7	98,95	111,38	123,85	136,32
Бензин, Аи-92, долл./л	0,00	0,00	0,64	0,67	0,70	0,74	0,77	0,80	0,84	1,04	1,22	1,41
Бензин, Аи-95, долл./л	0,00	0,00	0,69	0,72	0,75	0,79	0,82	0,86	0,90	1,10	1,29	1,49
Дизельное топливо, долл./л	0,00	0,00	0,65	0,68	0,71	0,74	0,78	0,81	0,85	1,05	1,24	1,43

3.2. Прогнозные оценки стоимости новых типов автомобилей среднего класса (вес 1200-1500 кг)

3.2.1. Двигатель внутреннего сгорания(ДВС)

Исторически сложилось, что в прошлом веке основным видом моторного топлива выступали жидкие углеводородные топлива (прежде всего – бензины и дизельное топливо). Эти топлива относятся к *традиционным видам* моторного топлива. К автомобильным моторным топливам предъявляются следующие основные требования:¹⁰

- бесперебойная подача топлива в систему питания двигателя;
- образование топливовоздушной смеси требуемого состава;
- нормальное (без детонации) и полное сгорание смеси в двигателях;
- обеспечение быстрого и надежного пуска двигателя при различных температурах окружающего воздуха;
- минимальное образование отложений во впускном и выпускном трактах и камере сгорания;
- длительное сохранение качества топлива при хранении и транспортировке;
- минимизация образования вредных выбросов при сгорании.

Преобладание нефтяных топлив в автотранспорте является следствием относительной простоты организации процесса их получения, хранения и использования. В настоящее время основными видами топлива для автомобилей являются продукты переработки нефти – бензины и дизельные топлива. Они представляют собой смеси углеводородов и присадок, предназначенных для улучшения их эксплуатационных свойств. В состав бензинов входят углеводороды, выкипающие при температуре от 35 до 200°C, а в состав дизельных топлив – углеводороды, выкипающие в пределах 180...360°C. Как правило, выход бензинов при нефтепереработке достигает 50-60%, а дизельных топлив – 15-18%.¹¹

Бензины в силу своих физико-химических свойств применяются в двигателях с принудительным зажиганием (от искры) непосредственно в камере сгорания двигателя. Более тяжелые дизельные топлива вследствие

¹⁰Госстандарт. Топливо (<http://auto.gosstandart.info/avtohimiya/toplivo/>)

¹¹<https://myfin.by/wiki/term/skolko-benzina-poluchaetsya-iz-barrelya-nefti>

лучшей самововозгораемости используются в двигателях с воспламенением от сжатия.

Проблемные вопросы ДВС.

Важнейшим параметром автомобилей с ДВС, определяющим его экономичность, является показатель расхода топлива. Поскольку дальнейший рост показателей эффективности двигателя внутреннего сгорания практически исчерпан, то снижение расходов топлива сегодня возможно в основном счет уменьшения веса автомобиля и повышение аэродинамических свойств кузова.

Расширение использования легких сталей, алюминия, пластмасс создает возможности для снижения веса автомобиля без ущерба для безопасности и комфорта. Отмечается, что в течение долгого времени сокращение на 10% веса автомобиля приводило к снижению расхода топлива на 5,6-8,2%.¹² В обозримой перспективе существуют возможности дальнейшего снижения веса автомобиля еще на 28-30% к 2030.¹³

Одновременно со снижением веса автомобиля наблюдается систематическое увеличение мощности двигателя, что в свою очередь ведет к росту расхода топлива. В среднем по автомобилям компакт-класса в 2010 г. отношение мощности к весу автомобиля составляло около 0,102 кВт/кг.¹⁴ В период 1995-2010 гг. этот показатель возрастал с темпом 0,5-2,5% в год. Принимая, что дальнейший рост этого показателя может составить 1,3-1,5% в год, то получаем, что к 2030-2035 гг. показатель энергоемкости легкового автомобиля может возрасти до 0,135 кВт/кг. В целом следует ожидать, что обе тенденции могут привести к тому, что мощность двигателя практически останется на стабильном уровне. В дальнейших расчетах принята средняя мощность легкового автомобиля компакт-класса равной 85 кВт (115 л.с.).

Основная экономия расходов топлива в ДВС легковых автомобилей может быть получена за счет снижения аэродинамического сопротивления кузова, сопротивления качению и повышения эффективности трансмиссии. За счет этих факторов удельный расход может быть снижен на 12% к 2030 г., в том числе за счет улучшения аэродинамических свойств автомобиля на 4,4%, снижения сопротивления при качении на 6,7% и совершенствования трансмиссии на 0,9%.¹⁵ К этим величинам следует добавить эффект от применения системы "стоп/старт", что позволяет почти на 60% снизить

¹²Gillespie, Th. Fundamentals of Vehicle Dynamic, SAE International, 1999.

¹³MIT. In the Road in 2035, 2008; Lotus Engineering Inc. An Assessment of Mass Reduction Opportunities, 2010.

¹⁴ Оценено по данным www.automobile-catalog.com

¹⁵Influence on the Low Carbon Car Market from 2020-2030. Final Report. Element Energy, July 2011.

потери двигателя при работе в режиме холостого хода.¹⁶ Влияние этих факторов отражено в прогнозных оценках расходов топлива типовым автомобилем компакт-класса, приведенных ниже в табл. 2.

Недавно появилось интересное сообщения, что компания MWIWaveIgnitionAG приступила к исследованиям по продлению срока службы традиционных ДВС и повышению их эффективности.¹⁷ Разработанная альтернативная система зажигания поможет снизить расход топлива на 30% и уменьшить вредные выбросы на 80%. Технология использует вместо искрового разряда импульсный микроволновой разряд. Эта система может быть адаптирована для любых современных двигателей без необходимости внесения изменений в конструкцию двигателя. MWI уже начал переговоры с корейскими и китайским автопроизводителями. Одним из потенциальных партнеров выступает Hyundai. Кроме того, заключено соглашение с компанией Fach Auto Tech, принимающей участие в монокубке Porsche Mobil 1 Supercup. Предполагается, что систему зажигания на основе микроволновых импульсов будут использовать на гоночных машинах в ближайшие годы.

По другому пути, также ведущему к снижению расхода топлива, пошла Mazda. Японская компания разработала двигатель Skyactiv-X, который работает по измененному циклу HCCI (Homogenous Charge Compression Ignition) — воспламенение однородной смеси от сжатия. Такой агрегат дебютировал на новой Mazda3, где стал частью гибридной силовой установки.

Большие перспективы в повышении эффективности традиционных ДВС открываются за счет использования альтернативных моторных топлив. Наиболее перспективными альтернативами моторными топливами для развития транспортных средств сегодня являются: *природный газ, синтетические моторные топлива, биотоплива, электроэнергия и водород.*

Природный газ. В настоящее время в транспортных средствах используются две формы природного газа: *компрессированный (сжатый) природный газ* (КПГ) и *сжиженный природный газ* (СПГ). 1 м³ природного газа содержит приблизительно такое же количество энергии, как и в 1 литре дизельного топлива. Для сравнения энергосодержание 1 л бензина составляет 34 МДж, пропан-бутана - 25,4, сжиженного природного газа – 25. Транспортные средства на природном газе в части развиваемой мощности, ускорения и крейсерской скорости практически сопоставимы с работающими на жидких углеводородах.

¹⁶The King Review of Low-Carbon Cars, King Review 2007.

¹⁷https://motor.ru/news/mwi-14-12-2018.htm?utm_source=from_lenta&referrer=longgrid_6

Природный газ в качестве альтернативного топлива уже начинает использоваться в транспортных средствах. Применение природного газа позволяет сократить затраты на транспортные перевозки, уменьшить выбросы вредных веществ в городских условиях, где проблемы экологии стоят наиболее остро. Перевод транспорта на природный газ позволяет сократить поступление парниковых газов в атмосферу, что сокращает влияние антропогенного фактора на изменение климата. Природный газ сегодня и на ближайшие десятилетия останется самым безопасным, более чистым и экономически выгодным заменителем традиционных транспортных топлив.

В 2015 г. транспортные средства во всем мире использовали около 120 млрд. м³ природного газа в год, что составило 3,6% мирового потребления топлива на транспорте.¹⁸ Количество газифицированных автомобилей во всем мире достигло более 25 млн. Средний годовой рост парка газифицированных автомобилей в период 2000-2017 гг. составлял около 20%. Ожидается, что к 2021 г. численность парка достигнет около 30 млн. авто.

Однако, одним из главных препятствий для газификации транспорта является нерешенность проблемы создания наиболее экономически эффективной инфраструктуры снабжения потребителей газом – в газообразном или сжиженном виде. Хотя материально-технические и технические барьеры здесь в принципе не так велики, политика и финансовая поддержка должны полностью реализовать экономические выгоды от использования природного газа в качестве транспортного топлива.

Синтетические жидкие топлива. Существуют технологии получения синтетических жидких углеводородов (СЖТ), используемых в качестве моторных топлив. В качестве сырья для таких процессов используются прежде всего уголь или природный газ.¹⁹

Уголь – твёрдое вещество с молярным отношением содержания водорода к углероду (H/C) равным 0,8. Для сырой нефти этот коэффициент H/C составляет 1,3–1,9; для бензина и дизельного топлива – примерно 2. Чтобы преобразовать уголь в жидкое топливо, необходимо ввести в его структуру недостающий водород. Это можно осуществить методом пиролиза или (что более эффективно) методом *прямого* или *непрямого сжижения угля*.

Разработаны несколько различных методов сжижения угля, которые оказывают значительное влияние на выход, характеристики и состав конечной продукции. В процессе переработки загрязняющие уголь вещества

¹⁸ NGV Global. The Natural Gas Vehicle Knowledge Base, <http://www.ngvglobal.org>

¹⁹ Использованы материалы магистерской диссертации Колпакова А.Ю. (научный руководитель – Синяк Ю.В.).

(сера и азот) в значительной мере удаляются, а получаемые углеводороды очищаются методом, аналогичным дистилляции сырой нефти. Конечными продуктами конверсии угля являются: чистые жидкие виды топлива (бензин, дизельное топливо, авиационное топливо) и другие химические соединения (лигроин, смазочные масла, сера, аммиак).

Основные компании, обладающие передовыми технологиями сжижения угля являются *Chevron, General Electric, Lurgi, ExxonMobil, Sasol и Shell*. Рентабельность предприятия по конверсии угля в жидкое топливо в большой мере зависит от цен на нефть. Таким образом, основной вопрос заключается в том, достигнут ли мировые цены традиционной нефти уровня, достаточного обеспечения конкурентоспособности синтетических топлив, при котором будут компенсированы высокие инвестиционные затраты и рыночная неопределённость.

Помимо высокой капиталоемкости и обычных инвестиционных рисков с этими крупномасштабными проектами могут быть связаны значительные экологические риски. Для проектов переработки угля требуется большое количество воды, что порождает проблемы для богатых углём северо-западных регионов Китая, не имеющих больших запасов воды. Кроме того, без необходимых очистных сооружений отходящий газ, сточные воды и промышленные выбросы станут существенной проблемой для окружающей среды. Поэтому в настоящее время интерес к получению СЖТ из угля находится на низком уровне в связи с изменением энергетической политики, расширением запасов природных углеводородов и ограничениями на выбросы парниковых газов.

Еще одной технологией, основанной на применении метода Фишера-Тропша, является *производство синтетических жидких топлив из природного газа (GTL - Gas-to-Liquid)*. В основе всех методов конверсии природного газа также лежит процесс получения синтез-газа. Основными продуктами технологии GTL являются прямогонные бензины (нафта), дизельное топливо, сжиженные газы и высокомолекулярные парафины.

Продукты растительного происхождения (*биотоплива*) по своему составу после технологической переработки могут вполне заменять традиционные жидкие углеводородные топлива, используемые в ДВС, что и делается достаточно успешно в странах с благоприятными климатическими условиями. Однако, стоимость получения таких биотоплив достаточно высока и имеют тенденцию к росту в связи с ростом спроса со стороны пищевых продуктов.

Биотопливо производится из биомассы растительного происхождения или органических отходов. Такая биомасса может использоваться в

низкоконцентрированных смесях (5-10%) с бензином или дизельным топливом в ДВС без модификации двигателя и в высоких концентрациях (85-100%) в специально адаптированных транспортных средствах. Для получения более качественных биотоплив требуется специальная переработка органических материалов. Как правило, в процессе переработки органики получаются два основных продукта – *биодизель или биоэтанол*.

Основным недостатком жидких биотоплив из сырья растительного происхождения является использование пищевых продуктов, что при массовом производстве может обострить ситуацию на рынках продовольствия. Поэтому жидкие биотоплива смогут найти применение только в ограниченном масштабе в странах, где проблемы со свободными землями, благоприятными климатическими условиями и голодом в принципе уже решены. Переход на более сложные процессы переработки сырья с высоким содержанием лигнина (древесина и др.) пока не позволяет получить жидкие углеводороды, способные успешно конкурировать с традиционными нефтепродуктами из сырой нефти.

Использование биотоплива в настоящее время является спорным вопросом. В настоящее время производство биотоплива требует большого количества пахотных земель и связано с ростом рисков, отвлекающих сельскохозяйственное производство от получения продуктов питания. Это может привести к увеличению мировых цен на продукты питания, если биотоплива получат широкое распространение.

Все новые виды топлива мало изменяют двигатель внутреннего сгорания, хотя существуют возможности дальнейшего некоторого увеличения его экономичности за счет определенных усовершенствований. Одновременно появление новых способов управления автомобилем (например, за счет автоматизации процесса управления) безусловно скажутся на увеличении стоимости автомобиля. В табл. 2 приведены наши оценки возможного изменения стоимости новых автомобилей среднего класса с ДВС

Таблица 2. Прогноз усредненных параметров новых автомобилей с ДВС среднего класса (вес 1200-1500кг) (в ценах 2019 г.)*

Двигатель внутреннего сгорания (бензин, дизтопливо, природный газ, СЖТ и др.)						
	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Мощность, кВт	85	85	85	85	85	85
Расход топлива, л/100 км	6	5,6	5	4,8	4,2	3,9
Кузов, \$	12000	12000	12000	12000	12000	12000
Удельная стоимость	43	50	51	54	55	57

двигателя, \$/кВт						
Итого ДВС, \$	3655	4250	4335	4590	4675	4845
Прочее оборудование, \$*	1180	1200	1300	1500	2500	3000
Всего (округленно), \$(долл. 2019 г)	16835	17450	17635	18100	19175	19845
Всего, млн. руб.	1,1	1,12	1,5	1,17	1,25	1,3
<i>* Электроника, очистка выбросов и др. устройства</i>						

3.2.2. Электромобили

Электропривод в течение относительно длительного времени широко применяется для массовых перевозок пассажиров и грузов по рельсам (железнодорожный транспорт, городской массовый транзит – метрополитен, трамваи, троллейбусы). Электромобиль в общепринятом понимании относится к разряду транспортных средств, которые приводятся в движение от электродвигателя, питаемого от электроаккумулятора (батареи), заряжаемого от сети.²⁰ Исторически электромобиль появился ранее двигателя внутреннего сгорания. Первый электромобиль в виде тележки с электромотором был создан в 1841 г. Однако, это направление тогда не получило развития по техническим и экономическим причинам. Интерес к внедрению электроэнергии на автотранспорте появился в последние двадцать лет в связи с требованиями защиты окружающей среды. Это инициировало широкий круг исследований, особенно в области хранения электроэнергии, которые привели к значительному сокращению затрат на эксплуатацию электрического автотранспорта и сделали эту технологию одним из наиболее перспективных направлений развития автотранспорта, особенно легкового.

До сих пор, основные трудности применения электроэнергии в легковом автотранспорте заключались в отсутствии дешевых и энергетически эффективных накопителей электроэнергии. Прогресс в области создания электроаккумуляторов для электромобилей позволил снизить стоимость электроаккумуляторов и увеличить дальность пробега на одной зарядке до 400-500 км, что приблизило электромобиль к ДВС. Одновременно произошло снижение стоимости электромобиля по сравнению с традиционным авто на жидком топливе. Ожидается, что в ближайшие 10-15

²⁰ В строгом смысле слова автомобиль с топливным элементом также можно отнести к разряду электромобилей, т.к. в нем используется электродвигатель, питаемый от электроэнергии, вырабатываемой непосредственно на борту автомобиля.

лет электромобиль сможет стать вполне конкурентоспособным с автомобилем на ДВС.

Сегодня существует несколько разновидностей электромобилей. К их числу относятся:

- *Гибридные автомобили без подзарядки батареи* имеют небольшой электромотор и батарею, подзаряжаемую от системы рекуперативного торможения. Это обеспечивает пробег такого автомобиля на чистой электрической тяге на расстояние 2-3- км. Подзарядка батареи от сети отсутствует. Электрический двигатель используется для движения на низкой скорости в дополнение к ДВС. Примеры этого автомобиль являются первые Toyota Prius и Lexus RX450h.
- *Гибридные автомобили с зарядкой батареи от сети.* ДВС используется как дополнительный силовой агрегат. Электроэнергия может использоваться в чистом электрическом режиме на расстояниях в десятки километров. Примером этого автомобиля является Toyota Prius последующих выпусков, Chevrolet Volt, Opel Ampera и др.
- *Электромобиль – полностью электрический автомобиль содержит только аккумулятор и электродвигатель.* Зарядка автомобиля осуществляется от сети. Примерами чистых электромобилей являются Nissan Leaf, Mitsubishi i-MiEV, BMW i3 и др. Сейчас все основные производители автомобилей начинают выпускать чисто электрические автомобили.

По мере совершенствования системы хранения электроэнергии гибридные автомобили уступают место автомобилям с подзарядкой (частичной или полной) от электросети. В табл.3 показаны усредненные характеристики наиболее распространенных электромобилей, доступных на европейском рынке.

В отличие от автомобиля с ДВС преобразование энергии в самом электромобиле происходит с высоким КПД (до 85-90%). Однако, потери при генерировании и доставке электроэнергии до аккумулятора составляют не менее 30-35%, что в энергетическом отношении делает этот вид транспорта практически сопоставимым с ДВС. Следует подчеркнуть, что в отличие от ДВС в электромобилях расходы топлива при городской езде на 15-20% ниже, чем в загородном цикле.²¹

Таблица 3. Некоторые характеристики современных электромобилей

²¹EVT – Electric Vehicle Transportation Center. Electric Vehicle Life Cycle Cost Assessment, Sept. 2014.

<i>Тип электромоби ля</i>	<i>Цена , тыс. долл.</i>	<i>Мощност , кВт</i>	<i>Емкость аккумулятор а, кВтч</i>	<i>Пробе г, км</i>	<i>Уд. расход электроэнергии, кВтч/100 км</i>
BMW i3	43,4	125	25	150	20
Ford 500e	32,8	83	24	135	18
Ford Focus Electric	29,2	107	23	120	20
Hyundai Ioniq Electric		88	28	200	20
KIA Soul EV	32,8	87	27	145	20
Mercedes-Benz B250e	41,5	107	23	140	16
Mitsubishi i- MiEV	23,8	49	16	150	11
Nissan Leaf	34	80	30	170	18
Tesla Model S	80	140	80	430	19
Средние значения	35	85	25	150	17

Источник: EVRATER (<https://evrater.com/evs>)

Парк электромобилей в мире быстро возрастает. В 2018 году он превысил 5,1 млн., что на 2 млн. больше, чем в предыдущем году, и почти вдвое увеличил количество регистраций новых электромобилей. КНР имеет крупнейшим в мире рынок электромобилей, за ней следовали Европа и Соединенные Штаты. Норвегия была мировым лидером по доле рынка электромобилей (46%). Глобальный парк электрических двухколесных транспортных средств составлял 260 млн. к концу 2018 г., и 460 тыс. электрических автобусов. В грузовом транспорте электромобили в основном использовались как легкие коммерческие автомобили, которые достигли 250 тыс. в 2018 г. Суммарный расход электроэнергии для привода электромобилей в 2018 г. составил около 58 ТВтч (в основном этот расход пришелся на двухколесный транспорт в Китае). При этом суммарные выбросы в атмосферу электромобилями составили 41 млн. т CO₂, что оказалось на 36 млн. т CO₂ меньше, чем эквивалентным парком ДВС.²²

Проблемные вопросы создания и применения электромобилей.

²²IEA (2019), "Global EV Outlook 2019", IEA, Paris, www.iea.org/publications/reports/globalevoutlook2019/.

Электроаккумуляторы. Создание дешевых и надежных накопителей электроэнергии в настоящее время связано с разработкой и усовершенствованием литий-ионных аккумуляторов. Стоимость батарей этого типа, пригодных для использования в электромобилях, существенно снизилась за последние годы: только с 2007 по 2014 г. темп снижения стоимости составил около 14% в год (с 1000 долл./кВтч до 350-410 долл.). Ожидается, что стоимость аккумулятора может достигнуть к 2030 г. до 100 долл./кВтч.

Большая часть текущих усовершенствований в накопителях электроэнергии связана с повышением плотности заряда, что достигается за счет использования новых материалов при изготовлении электродов и повышения напряжения заряда. В ближайшие годы большие надежды возлагаются на применение никель-кобальт-марганцевых катодов и силиконовых анодов. Это позволит увеличить емкость аккумуляторов до 400 Втч/л.²³

В стадии исследований находятся несколько новых концепций дальнейшего повышения производительности и снижения стоимости аккумуляторов. Большие перспективы ожидаются от литий-серных и литий-воздушных аккумуляторов, которые имеют самую высокую теоретическую плотность энергии (более 2500 Втч/кг). Однако все они пока имеют много нерешенных технических проблем, прежде чем станут приемлемыми для применения в автомобильном транспорте.

Учитывая удельные расходы электроэнергии в электромобилях и плотность существующих и перспективных аккумуляторов приходится считаться с ограничениями по весу накопителя, который должен быть размещен внутри электромобиля. По этой причине электромобиль еще не скоро сможет полноценно конкурировать с автомобилем с ДВС по показателю пробега на одной зарядке. Поэтому в варианте электромобилем приходится считаться с увеличенной частотой зарядок аккумуляторов. Это может ограничить сферу применения электромобиля и интерес к этому виду транспорта.

Агентство Moody's отмечает, что USDOE прогнозировало в 2012 г. снижение стоимости аккумуляторов к 2015 г. с 1000 долл./кВтч до 600 долл. как наиболее вероятную величину и 405 долл. как минимально возможную. Однако, фактические рыночные цены оказались ниже минимальных оценок USDOE. Сегодня компания TeslaEnergy продает батарейные блоки по цене 350 - 400 долл./кВтч и дальность пробега до 300-350 км. Компания ожидает,

²³ <https://www.economist.com/graphic-detail/2017/08/14/the-growth-of-lithium-ion-battery-power>

что цены к 2020 г. будут находиться на уровне 100 – 200 долл./кВтч.²⁴ В ближайшие годы компания планирует построить крупный завод по производству аккумуляторов для электромобилей. Это позволит снизить стоимость аккумуляторов до 88 долл. и даже до 38 долл.²⁵

Интересные прогнозы по стоимости электроаккумуляторов даются в работе,²⁶ где рассматриваются возможности сокращения стоимости аккумуляторов. По аналогии со динамикой снижения стоимости солнечных панелей, показано, что при достижении кумулятивной емкости выпущенных аккумуляторов до 1 ТВтч (сегодня она составляет около 7 ГВтч) стоимость электроаккумуляторов упадет до 100 долл./кВтч. (с учетом сопутствующих устройств это составит около 125 долл.).

Большие надежды возлагаются на переход к твердотопливным накопителям электроэнергии на базе графенов. В начале 2015 г. компания Supervault Inc. (США) продемонстрировала накопитель емкостью 1000 фарад. В отличие от литиевых батарей углеродосодержащие графены не создают угрозы окружающей среде, а запасы углерода во много раз превышают запасы лития. Предполагается, что стоимость хранения электроэнергии этими аккумуляторами удастся снизить до 100 долл./кВтч.²⁷ Компания Bosch (Германия) обещает в течение ближайших лет создать твердотопливный накопитель емкостью 100 кВтч с рекордно низким весом 190 кг (375 Втч/кг), стоимостью около 40 долл./кВтч и 500 циклов зарядки/разрядки, что будет достаточно для обеспечения около 250-300 тыс. км пробега без замены накопителя.²⁸ Это действительно обеспечит прорыв в коммерциализации электромобиля в секторе легковых автомобилей.

Ожидается, что спрос на электроаккумуляторы для электромобилей к 2040 г. возрастет в 136 раз (с 17 млрд. кВтч в 2015 г. до 2319 млрд. кВтч в 2040 г.).²⁹ Обеспечение такого спроса потребует инвестиций в размере около 325 млрд. долл. (из расчета 100 млн. долл. за 1 млрд. кВтч).³⁰

²⁴http://cleantechnica.com/2015/09/29/widespread-battery-storage-will-be-bad-news-for-gas-and-coal-generators/?utm_source=Cleantechnica+News&utm_medium=email&utm_campaign=fb53643621-RSS_EMAIL_CAMPAIGN&utm_term=0_b9b83ee7eb-fb53643621-331260817

²⁵http://cleantechnica.com/2015/09/21/tesla-gigafactory-battery-improvements-could-cut-battery-costs-70/?utm_source=Cleantechnica+News&utm_medium=email&utm_campaign=7268b7c9d5-RSS_EMAIL_CAMPAIGN&utm_term=0_b9b83ee7eb-7268b7c9d5-331260817

²⁶http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/forecast-2030--stored-electricity-at-005-kwh_100016581

²⁷<http://www.azonano.com/news.aspx?newsID=32513>

²⁸<http://cleantechnica.com/2015/09/21/bosch-solid-state-lithium-ion-batteries-could-hit-ev-market-within-5-years/>

²⁹ Goldman Sachs Group. Electric Vehicle Boom: ICE-ing The Combustion Engine, September 6, 2017.

³⁰ Там же, с. 29.

Потребление металлов в аккумуляторах. Эффективность электроаккумуляторов во многом определяется использованием металлов, в первую очередь таких, как литий, никель, кобальт, медь и др., которые способствуют снижению потерь внутри аккумулятора или играют роль катализаторов. Стоимость аккумулятора достигает 60% в стоимости электромобиля. При этом металлы составляют приблизительно 40% стоимости литий-ионного аккумулятора.³¹

Существует достаточно большое количество технологий аккумулярования электроэнергии, но в настоящее время считается, что литий-ионные батареи являются наиболее перспективными типами для заряжаемых электроаккумуляторов. В ближайшее десятилетие они составят подавляющее большинство рынка аккумуляторных батарей.

Каждая литий-ионная ячейка содержит три основные части: 1) анод (природный или синтетический графит), 2) электролит (соли лития), и 3) катод (различные сплавы на основе никеля, кобальта, алюминия, марганца).

Наиболее сложным и ответственным элементом батареи является катод, который определяет во многом характеристики батареи.

Стремление к созданию эффективных электроаккумуляторов приведет к увеличению спроса на ряд металлов. Наиболее важными из них являются кобальт. Около 40% кобальта используется для изготовления перезаряжаемых батарей. В ближайшие пару лет ожидается, что спрос на кобальт для электроаккумуляторов возрастет на 55%. Так, несмотря на то, что расход кобальта за последние годы в электромобилях Tesla снизился на 59% (с 11 кг в 2009-2012 гг. до 4,5 кг в 2018 г.), обеспечение кобальтом 800 млн. электромобилей в 2040 г., ожидаемых к этому времени на рынке, потребует около 4 млн. т металла (при современном расходе на один электромобиль около 5 кг кобальта). Полный спрос на кобальт достигнет практически половины мировых резервов кобальта.³² Учитывая тот факт, что половина мировых запасов кобальта расположена в Республике Конго (Африка), где сохраняется большая политическая нестабильность и неустойчивость внутренней ситуации, ориентация на использование кобальта в электроаккумуляторах может создать значительные риски в развитии электромобилей в связи с возможными колебаниями цен и поставок этого металла на мировой рынок. .

Что касается лития, то, по оценкам Goldman Sachs, модель Tesla S с батареей на 70 кВтч использует 63 кг литиевого эквивалента (LCE), что

³¹ S&P Global, Platts. Changing Lanes: A Road map for Transport and Future Energy Markets, February 2018, www.platts.com

³² Goldman Sachs Group. Electric Vehicle Boom: ICE-ing The Combustion Engine, September 6, 2017, p. 35.

соответствует примерно 12 кг лития на один электромобиль. В 2016 г. мировое производство лития составило 31,5 тыс. т,³³ из них в производстве литий-ионных аккумуляторов было использовано около 40%, из которых 14% приходилось на аккумуляторные батареи для электромобилей.³⁴ При ожидаемых темпах развития электромобилей в мире суммарное потребление лития к 2040 г. возрастет до 4,2 млн. т., т.е. составит около 30% разведанных ресурсов лития в мире (14,5 млн. т, 2016 г.). Это означает, что на каждый процент прироста парка электромобилей следует ожидать увеличение спроса на литий в размере 70 тыс. т LCE/год (более 13 тыс. т/год лития). Между тем, пока считается, что разведанные запасы лития (14,5 млн. т, 2016 г.)³⁵ достаточны для того, чтобы вполне удовлетворить ожидаемое увеличение спроса для производства литий-ионных батарей для электромобилей в первой половине XXI века. Однако для дальнейшего развития электромобилей литий может стать узким местом и потребуются поиск других материалов для изготовления электролита батарей.

Графит является важным материалом анода в электроаккумуляторах. В каждом аноде батареи Tesla Model S (85kWh) имеется 54 кг графита. Рынок графита быстро растет. По оценкам Benchmark Mineral Intelligence,³⁶ ожидается, что рынок анодного графита (натурального и синтетического) возрастет по меньшей мере втрое от 80 тыс. т в 2015 г. до не менее 250 тыс. т к концу 2020 г.

Система зарядки аккумуляторов. Определенные проблемы в распространении электромобилей могут возникать с организацией зарядки аккумуляторов. В особенности это относится к двум факторам: времени зарядки и частоты зарядки. Частота зарядки при заданном пробеге электромобиля и удельном расходе электроэнергии зависит от емкости аккумулятора и его весовых характеристик. Можно считать, что для автомобилей компакт-класса допустимый вес аккумулятора не должен превышать 500-700 кг. Поэтому энергоемкость аккумуляторов на единицу веса всегда будет ограничивать применение электромобилей. Правда, для большинства пользователей легковых автомобилей с ежедневным пробегом до 200-250 км и ежедневной подзагрузкой аккумуляторов это может оказаться вполне приемлемым, если электромобиль будет обеспечивать достаточно ощутимую выгоду по сравнению с ДВС.

³³ Там же, р. 35.

³⁴ EUROPEAN COMMISSION. Report on Raw Materials for Battery Applications. Brussels, 17.5.2018 SWD(2018) 245 final.

³⁵ Goldman Sachs Group. Electric Vehicle Boom: ICE-ing The Combustion Engine, September 6, 2017, р. 35.

³⁶ <https://www.benchmarkminerals.com/category/graphite/>

Время загрузки аккумулятора определяется мощностью зарядного устройства. На сегодняшний день разработаны и предлагаются зарядные устройства 4 типов:

- *Level 1* на напряжение от сети 110-240 в - зарядное устройство, подключаемое к домашней электросети через обычную розетку с силой тока 10–15 а. Передаваемая мощность составляет около 2,4 кВт. Один час зарядки с таким устройством обеспечивает 12 км хода электромобиля.
- *Level 2* на напряжение сети 220-240 в и с силой тока до 80 а (около 20 кВт). Некоторые марки электромобилей уже оснащены таким встроенным устройством. Зарядные устройства этого типа предназначены в основном для индивидуального пользования. Стоимость такого устройства находится в пределах двух тысяч долларов и падает по мере расширения парка электромобилей. Зарядка устройствами этого типа длится 8-10 час (1 час работы устройства обеспечивает пробег около 100 км пробега).
- *Level 3* – "быстрая" зарядка позволяет подзаряжать аккумулятор в любое время суток при мощности до 190 кВт. Устройства этого типа требуют специальной линии для энергоснабжения (480 в, трехфазный ток). Поэтому они стоят существенно дороже: до 85 тыс. долл. (предполагается, что эта цена может сократиться до 30 тыс. долл.) и ориентированы на публичные зарядные станции. Многие производители электромобилей начали массовый выпуск таких зарядных станций (Nissan, Aerovironment, SchneiderElectric, Coulomb, Eaton, Fuji и др.) для установки в крупных предприятиях и организациях. Быстрая зарядка устройством мощностью 50 кВт обеспечивает зарядку аккумулятора NissanLeaf за 30 мин. с 0 до 80%.³⁷
- *Level 4* – "супербыстрая" зарядка, разработанная компанией Tesla, при которой для зарядки батареи на каждые 400 км достаточно один час времени (по сведениям пока не поступила на рынок).

Существуют предложения в случае необходимости зарядки заменять аккумулятор на новый полностью заряженный. Однако, это возможно организовать только на специально приспособленных для такой замены электромобилях и требует инфраструктуры для быстрой смены аккумуляторов. Эту идею реализовала, например, компания GeneralMotors в проекте Hy-Wire. Компания Треха заявила о готовности

³⁷<http://www.greenbiz.com/blog/2013/01/17/how-important-charging-infrastructure-ev-adoption>

запустить серийное производство платформ для замены аккумуляторов в различных типах электромобилей. Но процесс требует не только технического решения, но и согласования с большим количеством компаний, уже выпускающих электромобили.

В России принято правительственное решение с установкой на всех АЗС специальных терминалов с напряжением 500 в и 125 а для подзарядки аккумуляторов электромобилей. Однако этот проект практически заморожен поскольку при существующей в стране массовой застройке считается, что время зарядки является слишком большим, что будет сильно ограничивать применение электромобилей в стране.³⁸

Беспроводная зарядка аккумуляторов. Технология основана на индуктивной зарядке, которая включает в себя передачу электроэнергии через воздушный зазор между двумя магнитными катушками. Это похоже на то, как работают зарядные устройства для беспроводных телефонов, но здесь масштаб магнитного потока должен быть значительно больше. Между тем, существует ряд принципиальных недостатков беспроводной зарядки:

- потеря энергии возрастают до 10-15%.
- создание инфраструктуры для беспроводной зарядки является дорогостоящим фактором, что приводит к ограничению использования беспроводной зарядки густонаселенными городскими районами.
- магнитные поля, возникающие при беспроводной зарядке, могут представлять вред для населения и электромагнитным устройствам, не относящимся к электромобилю.

В настоящее время существует ограниченное количество компаний, предлагающих беспроводную зарядку технологии. С 2012 г. компания Qualcomm Halo использует специальные системы беспроводной зарядки, которые уже используются в гонках серии Formula E. Они могут передавать до 22 кВт мощности, что соответствует тому, что предлагают существующие быстрые стационарные зарядные устройства³⁹.

Еще одним крупным разработчиком беспроводных систем является Plugless, которая предлагает беспроводная система зарядки для общественного пользования. Компания Nissan в настоящее время работает над «технологией будущего» для Nissan LEAF, которая включает беспроводную зарядку. На автосалоне в Париже Mercedes Benz объявил, что

³⁸<https://hi-tech.mail.ru/review/kak-ehlektromobili-zahvatyvayut-mir-i-pochemu-rossiya-soprotivlyaetsya/>

³⁹ Система Qualcomm Halo опробована при зарядке транспортных средств, движущихся со скоростью до 100 км/час на 100-метровой испытательной трассе. Погода не влияет на систему и работает одинаково хорошо даже на мокрой поверхности.

беспроводная зарядка будет доступна в некоторых из ее моделей уже в 2018 г.⁴⁰

Электромотор. Электромотор является важной частью электромобиля. Существуют две концепции использования электромотора: в качестве единого центрального двигателя или при установке электромоторов на каждом колесе. Стоимость электромотора включает собственно электромотор и связанные с ним контроллеры и инвертер.

Ожидается, что стоимость электромотора и сопутствующих компонентов снизится с 55-80 долл./кВт в 2010 г. до 8-35 долл. в перспективе до 2030-2035 гг.⁴¹ При этом не исключено, что возможный рост стоимости цветных металлов (литий, никель, кадмий, медь), используемых в электротехнических изделиях, будет скомпенсирован более интенсивным снижением затрат в связи с ростом масштабов производства и возможностью замены дорогих материалов более доступными и дешевыми.

По прогнозам, прочие компоненты электромобиля могут стоить от 2700-3000 долл.⁴² Эта группа расходов включает стоимость усиления электрических кабелей в электромобиле, установку регенеративного торможения, крепление аккумулятора и его охлаждение, зарядное устройство и пр. Однако, на фоне этого снижения прочих затрат нельзя исключать и их роста, особенно в связи с установкой на электромобилях систем рекуперативного торможения и др.

В табл. 4 приведены наши прогнозные оценки стоимости электромобилей среднего класса с учетом основных технологических изменений в основных компонентах конструкции электромобилей.

Таблица 4. Прогноз усредненных параметров новых электромобилей среднего класса (мощностью 75-120 кВт)* (в ценах 2019 г.)

Электромобиль						
	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Мощность, кВт	85	85	85	85	85	85
Пробег на одной зарядке аккумулятора, км	300	300	350	400	450	500
Расход электроэнергии, кВтч/100 км	20	18	17	16	15	13
Емкость электроаккумулятора, кВтч	60	54	59,5	64	67,5	65

⁴⁰www.slashgear.com

⁴¹MIT. In the Road in 2035, 2008

⁴²Influence on the Low Carbon Car Market from 2020-2030. Final Report. Element Energy, July 2011

Удельная стоимость электроаккумулятора, \$/кВтч	300	250	200	150	100	75
Всего стоимость электроаккумулятора, \$	18000	13500	11900	9600	6750	4875
Кузов, \$	12000	12000	12000	12000	12000	12000
Удельная стоимость электромоторов, \$/кВт	50	20	15	10	8	7
Всего электромоторы, \$	4250	1700	1275	850	680	595
Прочее оборудование, \$**	2360	2400	3000	3000	3000	3000
Всего (округленно), \$	36610	29600	28175	25450	22450	20500

* Примассовом производстве электромобилей

** Электроника, рекуперативные тормоза и прочие устройства.

Источники: Influence on the Low Carbon Car Market from 2020-2030. Final Report. Element Energy, July 2011; MIT. In the Road in 2035, 2008; McKinsey Co. A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis, 2010; Björn Nykvist & Måns Nilsson (2015) "Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles" *Nature Climate Change* 5, 329–332; Wolfram P., Lutsey N. Electric vehicles: Literature review of technology cost and carbon emissions. Working Paper 2016-14, ICCT; Un-Noor F., Padmanaban S., Mihet-Popa L. et al. A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development. *Energies*, 2017, 10, 1217; Fries M., Kewler M., Schickram S. et al. An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels, Greenhouse Gas Emissions and Total Cost of Ownership. Update 2017/

3.2.3. Водородный автомобиль с топливным элементом

Другим направлением альтернативных технологий на автотранспорте является использование электроэнергии, вырабатываемой в топливном элементе (ТЭ), работающим на водороде. Это, по сути дела, тот же электромобиль, только источником электроэнергии служит не электроаккумулятор, заряжаемый от традиционной энергетической системы, а собственная "электростанция" на борту автомобиля, работающая на газообразном или жидком водороде. Эти две конкурирующие технологии развиваются параллельно. Еще несколько лет тому назад считалось, что автомобиль с ТЭ имеет ряд неоспоримых преимуществ перед электромобилем, по крайней мере, по величине пробега на одной зарядке. Однако, стремительный прогресс в совершенствовании электроаккумуляторов позволил электромобилю сегодня вырваться вперед, что, по-видимому, поставило окончательную точку в гонке за рынок на ближайшие пол-века, хотя борьба за рынок автотранспорта продолжается.

В настоящее время на рынке имеется всего несколько прототипов автомобилей с ТЭ (Honda FCX Clarity, [Hyundai Tucson Fuel Cell](#), [Toyota Mirai](#),

HyundaiNexo). Многие компании имеют продвинутые концепты и прототипы, которые могут появиться на рынке в ближайшие годы.

Проблемные вопросы водородных автомобилей с ТЭ

Экономика водородных автомобилей в значительной мере определяется следующими факторами:

- 1) стоимость водорода и связанная с ним инфраструктура производства, доставки и хранения,
- 2) степень совершенств самого ТЭ как энергетической машины,
- 3) хранение водорода на борту автомобиля.

Топливные элементы. Основные перспективы водорода как энергоносителя связаны с использованием ТЭ. Существуют возможности применения водорода в «чистых» процессах горения с получением теплового эффекта и воды как продукта горения, хотя они вряд ли имеют перспективы для массового использования. ТЭ является электрохимическим источником электрического тока, в котором осуществляется процесс прямого превращения энергии топлива и окислителя, поступающих к электродам, непосредственно в электрическую энергию, минуя традиционные процессы горения топлива, сопровождающиеся большими потерями энергии.

Подобно электрическим аккумуляторам, ТЭ преобразуют энергию химических реакций непосредственно в электроэнергию. Но в отличие от электроаккумуляторов, которые должны заряжаться периодически, ТЭ может работать непрерывно за счет подвода реагентов извне. Так как преобразование тепла в работу в таких установках отсутствует, то их энергетический КПД значительно выше, чем у традиционных тепловых машин и может достигать 75-85%. Большинство типов ТЭ работают на водороде, получаемом различными путями, но существуют прототипы, которые позволяют использовать непосредственно другие углеводороды (метанол) или окиси углерода.

ТЭ был изобретен более 160 лет тому назад (1837 г.). Это технология старше двигателя внутреннего сгорания или электрической батареи. Однако активное развитие технологий использования ТЭ началось после Второй мировой войны в связи с развитием космической техники.

В России первые исследования по ТЭ начались в 60-х годах прошлого века. РКК «Энергия» (с 1966 г.) разрабатывала ТЭ элементы для советской лунной программы, которая так и не была осуществлена. С 1987 по 2005 г. «Энергия» выпустила около 100 ТЭ, которые наработали суммарно около 80 тыс. часов. Во время работы над программой «Буран» исследовались щелочные ТЭ. На «Буране» были установлены ТЭ суммарной мощностью 10 кВт. В 70-80

годы НПО «Квант» совместно с рижским автобусным заводом разрабатывали ТЭ для микроавтобусов. Прототип такого автобуса на ТЭ был изготовлен в 1982 г. В 1989 г. Институт высокотемпературной электрохимии (Екатеринбург) произвел первый твердооксидный ТЭ мощностью 1 кВт.

В последние годы (после 1999 г.) АвтоВАЗ начал работы с топливными элементами. Однако в 90-х годах, когда в мире начался бум в области водородной энергетики и топливных элементов, многие работы были свернуты из-за трудностей с финансированием. Лишь недавно наметился некоторый сдвиг, когда к финансированию водородной проблематики подключился бизнес. В конце 2003 г. было подписано соглашение между РАН и ГМК «Норильский никель», предусматривающее развитие поисковых, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по водородной энергетике и топливным элементам в России.

Существует широкий ряд различных ТЭ, принципиально различающихся составом электролита, требованиями к рабочему агенту, параметрами процесса, условиями применения. Наиболее перспективным типом ТЭ для автотранспорта являются ТЭ с протонообменной мембраной (PEM–proton-exchange fuel cell). Эти элементы работают при температурах 50-100°C, но требуют применения дорогостоящих платиновых катализаторов на аноде и катоде. Съём мощности у этих ТЭ достаточно высокий (3,8-13,5 кВт/м²). В связи с низкими рабочими температурами ТЭ типа PEM требуют установки дополнительного внешнего устройства для получения водорода (например, путем риформинга углеводородов из природного газа), что увеличивает стоимость установки. ТЭ типа PEM хорошо работают в переменных режимах нагрузки и имеют короткий срок выхода в рабочее состояние (1-3 сек.). Ожидается, что стоимость водородного двигателя на базе ТЭ может быть доведена до 30-50 долл./кВт и менее к 2020 г.⁴³ В значительной мере сокращение стоимости ТЭ было достигнуто за счет снижения расходов платины. Если в начале периода расход платины составлял 20 г/кВт, то к 2005 г. он был снижен до 0,8 г/кВт. Срок службы ТЭ повышен с 950 час. в 2006 г. до 1900 час. в 2008 г. и до 3500 час. в 2010 г. Ожидается, что к 2015 г. расход платины будет уменьшен до 0,2 г/кВт, что позволит иметь стоимость ТЭ около 30 долл./кВт при сроке службы 5000 час., что соответствует примерно 240 тыс. км пробега. Это сделает ТЭ вполне приемлемым для использования взамен традиционного ДВС. Одновременно удельная мощность ТЭ увеличилась с менее 100 Вт/л в 1990 г. до 2500 Вт/л в 2013 г.⁴⁴

⁴³http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/10004_fuel_cell_cost.pdf

⁴⁴USDRIVE. Fuel Cell Technical Team Roadmap, June 2013 (energy.gov/sites/.../fctt_roadmap_june2013.pdf)

Производство ТЭ в мире неуклонно возрастает. В 2014 г. было выпущено около 105 тыс. ТЭ с суммарной мощностью 222 МВт. Рост по сравнению с 2009 г. составил почти 50%. Предполагается, что в ближайшие годы выпуск ТЭ достигнет 650 МВт в год, в том числе более 50% от этой величины будет приходится на транспортные системы, из которых наибольшая доля принадлежит ТЭ типа РЕМ(65%).⁴⁵

Производство водорода. Получение H₂ является важнейшей частью технологии водородного автомобиля. Существует достаточно широкий список технологий производства H₂ и доставки его на борт водородного автомобиля.⁴⁶ Применительно к исходным данным по стоимости энергоносителей (см. табл. 1) стоимость водорода для применения в водородной автомобиле может составить (долл./кг):

	2020	2040
<i>При централизованном производстве:</i>		
- методом прямой конверсии метана	2,3-2,5	1,4-1,6
- методом газификации угля	5,6-5,8	3,8-4,0
- электролизом от энергосистемы	6-7	8,2-8,5
- электролизом на базе солнечных и ветровых электростанций	9-10	7-8

При децентрализованном производстве:

- электролизом от энергосистемы 14-17

Хранение водорода. Хранение водорода представляет серьезную проблему, которую предстоит решить для повышения конкурентоспособности автотранспорта с ТЭ. Считается, что для конкуренции с ДВС автомобиль с ТЭ должен обеспечивать пробег на одной заправке не менее 300 миль (ок. 500 км). Для автомобиля компакт-класса это соответствует расходу водорода 4-5 кг/100 км.

По весу водород почти в три раза больше содержит энергии, чем бензин (по низшей теплоте сгорания 33 кВтч/кг для H₂ по сравнению с 12 кВтч/кг для бензина). Однако, в объемном соотношении он в 10 раз уступает бензину (приблизительно 1 кВтч/л для водорода при 700 атм. при 15°C по сравнению с 9 кВтч/л для бензина). Поэтому для применения водорода в реальных условиях требуется повышение плотности энергосодержания на

⁴⁵ Там же.

⁴⁶ См. подробнее работу Синяка Ю.В. и Петрова В.Ю. Прогнозирование оценки стоимости водорода в условиях его централизованного производства. *Проблемы прогнозирования. 2008. N 3. - С. 35-46*, посвященной моделированию технологий получения H₂ для использования в транспортных средствах.

единицу веса. Это может быть достигнуто несколькими путями: увеличением давления, переводом H₂ в жидкую фазу или использованием специальных материалов, поглощающих водород при определенных условиях (сорбенты, металл-гидриды и др.). Считается, что в краткосрочной перспективе наиболее приемлемым способом хранения водорода на борту автомобиля остается использование сжатого газообразного водорода с хранением в композитных баллонах под давлением до 350-700 атм. Эти системы громоздки, тяжелы и дороги. В дальнейшем следует ожидать перехода к сжиженному водороду при температуре -253°C. Системы хранения сжиженного водорода сегодня на порядок реже, чем в газообразном виде, но ожидается, что через десяток лет этот метод станет коммерчески оправданным. Хранение в твердых материалах может позволить значительно снизить вес и затраты по хранению, но этот метод пока находится на ранней стадии разработки.⁴⁷

В настоящее время стоимость емкости для хранения водорода на борту автомобиля оценивается величиной 550-580 долл./кг H₂ (17-18 долл./кВтч). В 2017 г. ожидается снижение до 360 долл./кг H₂ (11-12 долл./кВтч)⁴⁸ [76]. По оценкам [34], стоимость водородной системы при 700 атм. может снизиться к 2030 г. 150-250 долл./кг H₂ (5-8 долл./кВтч).

Транспорт водорода. Доставка водорода является неотъемлемой частью централизованных систем водородной экономики. Для транспорта сжатого водорода используются грузовые автомобили с емкостями высокого давления или трубопровод, для сжиженного водорода – грузовой автомобиль с криогенным танком. Средний объем перевозки водорода одним грузовым автомобилем составляет около 1400 кг для газообразного водорода под давлением и примерно 1600 кг для жидкого водорода.

Газообразный водород при сравнительно небольших расстояниях может доставляться к потребителям специализированным автотранспортом в емкостях под давлением 200 атм. Стоимость такой цистерны емкостью 22 куб. м составляет около 100 тыс. долл. Для крупных поставок на значительные расстояния целесообразно использовать трубопроводный транспорт. Стоимость прокладки трубопровода диаметром 250 мм достигает 2,4 млн. долл./км.⁴⁹ Поставки сжиженного водорода осуществляются в

⁴⁷http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv_challenges.shtml; <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>; <http://www.c2es.org/technology/factsheet/HydrogenFuelCellVehicles>

⁴⁸US DOE. An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities. Quadrennial Technology Review, Sept. 2015

⁴⁹Amos W., Costs of Storing and Transporting Hydrogen, National Renewable Energy Laboratory, November 1998, <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/25106.pdf>

криогенных цистернах авто- или железнодорожным транспортом. Стоимость автомобильной криогенной системы достигает 350 тыс. долл. (22 куб. м).

В расчетах принято, что удельные капиталовложения в элементы технологий транспорта водорода составляют: *грузовик-тягач* – 130 тыс. долл., *прицеп-платформа для перевозки емкостей* – 75 тыс. долл., *емкости для перевозки сжатого водорода* – 120 тыс. долл. (для сжиженного водорода - 350 тыс. долл.), *трубопровод* – 2,4 млн. долл./км.⁵⁰ Срок службы технологий транспорта водорода: грузовики – 15 лет, цистерны – 15 года, трубопроводы – 25 года.

При принятых допущениях стоимость доставки водорода на расстояние 50 км будет составлять: *для газообразного водорода* – 0,13-0,17 долл./кг H₂ при автомобильных перевозках и 0,6-0,7 долл./кг H₂ при транспорте по трубопроводу, а *для жидкого водорода* – 0,20-0,25 долл./кг H₂.

Заправка автомобиля водородом. В расчетах капитальные затраты на одну раздаточную колонку с одним краном для сжатого водорода приняты в размере 80 тыс. долл. (для сжиженного H₂ - 150 тыс. долл.).⁵¹ Срок службы раздаточной колонки составляет для сжатого водорода 10 лет (для сжиженного 8 лет). При этих данных стоимость водорода у потребителя возрастает на 0,21 долл./кг H₂ для сжатого водорода и на 0,11 долл./кг H₂ для жидкого.

Таким образом, инфраструктурные затраты в сумме увеличивают стоимость водорода в баке автомобиля на 0,8 -1 долл./кг H₂ для газообразного водорода и примерно на 2,6-3 долл./кг H₂ для сжиженного по сравнению с затратами его получения на заводе при централизованном производстве.

В соответствии с рассмотренными в этом разделе тенденциями совершенствования основных компонентов автомобиля с ТЭ были составлены оценки ожидаемой стоимости этой технологии в период до 2040 г. (табл. 5). Эти оценки приняты в расчетах экономической эффективности пробега автомобиля с ТЭ.

Таблица 5. Прогноз усредненных параметров новых водородных автомобилей с топливным элементом (мощностью 75-120 кВт)
(в ценах 2019 г.)*

⁵⁰Hydrogen Pipelines. HyWeb, 18 Dec. 2002, Ludwig-Boelkow-Systemtechnik GmbH/German Hydrogen Ass., www.hydrogen.org/News/arcv402e.html#LBST%20Analysis%2002-12-18; Lovins A. Twenty Hydrogen Myths, Rocky Mountain Institute, 20 June 2003, updated 17 June 2005.

⁵¹Wilson J. The Truth about Hydrogen. A Response to Amery Lonins' "Twenty Hydrogen Myths", Sept. 25, 2003

Водородный автомобиль с топливным элементом (ТЭ)						
	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Мощность, кВт	85	85	85	85	85	85
Пробег на одной заправке, км	400	450	550	650	750	950
Удельный расход H ₂ , кг/100 км	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1
Кузов, \$	12000	12000	12000	12000	12000	12000
Удельная стоимость топливного элемента, \$/кВт	215	175	120	100	75	50
Всего стоимость топливного элемента, \$	18275	14875	10200	8500	6375	4250
Удельная стоимость емкости для хранения H ₂ , \$/кг H ₂	650	550	350	200	175	150
Емкость для H ₂ , кг H ₂	4,4	4,95	6,05	7,15	8,25	9,5
Стоимость емкости для H ₂ , \$	2860	2722,5	2117,5	1430	1443,75	1425
Удельная стоимость электромоторов, \$/кВт	50	20	15	10	8	7
Всего электромоторы, \$	4250	1700	1275	850	680	595
Прочее оборудование, \$*	2360	2400	2600	3000	3000	3000
Всего (округленно), \$	39745	33700	28190	25800	23500	21250

* Электроника, рекуперативные тормоза и прочие устройства.

Источники: Синяк Ю.В., Петров В.Ю. Экономические условия появления водорода как энергоносителя на энергетическом рынке России, Открытый семинар "Экономические проблемы энергетического комплекса", 101 заседание, 27 мая 2009 г., ИНП РАН, Москва, 2009; Influence on the Low Carbon Car Market from 2020-2030. Final Report. Element Energy, July 2011; US DRIVE. Fuel Cell Technical Team Roadmap, June 2013 (energy.gov/sites/.../fctt_roadmap_june2013.pdf); US DOE. An Assessment of Energy Technologies and research Opportunities. Quadrennial Technology Review, Sept. 2015.

С учетом рассмотренных тенденций вполне возможно, что стоимость автомобиля с ТЭ может снизиться к 2035 г. до 20-25 тыс. долл. (2015 г.) (примерно в 2 раза) и станет вполне сопоставимым с электромобилем.

3.3. Оценка ущербов для здоровья людей и окружающей среды от загрязнения атмосферы выбросами автотранспорта

Наиболее сложной и проблематичной во всех расчетах является *экономическая оценка ущерба от загрязнения окружающей среды*. Эти оценки зависят от большого числа факторов и имеют широкий диапазон значений, приводимых в зарубежных источниках. Поэтому в данной работе этот показатель носит скорее иллюстративный характер, чтобы обозначить значимость фактора экологических ущербов при выборе инновационных технологий, каковыми являются альтернативные моторные топлива.⁵²

Исследования эпизодов загрязнения воздуха показали, что очень высокие уровни загрязнения атмосферного воздуха связаны с увеличением неблагоприятных последствий для здоровья людей. Особенно сильно это проявляется в городских районах с высокой плотностью населения. Последствия для здоровья, связанные с острыми краткосрочными воздействиями, включают преждевременную смертность, случаи госпитализации в связи с сердечно-сосудистыми обострениями, приступы астмы и другие респираторные симптомы. Особенно сильно это проявляется в связи с загрязнением воздуха крупными частицами (обычно PM₁₀), а также для озона.

В результате возникают серьезные экономические издержки из-за дополнительной нагрузки на здравоохранение, потерь рабочего времени, боли и страдания пострадавших лиц.

Загрязнение воздуха также влияет на других реципиентов. Это отражается в разрушении строительных материалов, повышенной коррозии металлов, разрушении памятников культурного и исторического значения. Загрязнение воздуха также может влиять на природные экосистемы, начиная от лесов до пресных вод, приводить к подкислению и эвтрофикации водоемов.

Эффект от влияния загрязнения окружающей среды не является однозначным. Так, озон признан наиболее серьезной региональным загрязнителем для сельскохозяйственного сектора. Другие загрязнители воздуха (например, SO₂, NO₂, NH₃), по опубликованным данным, имеют менее выраженный эффект, хотя считается, что ущерб от них значительно преуменьшен. Исследования этого вопроса далеко не закончены.

Ряд зарубежных исследований по вопросам экономической оценки влияния загрязнения атмосферы показал, что наибольшая доля в возможном

⁵² Как показывают выводы этого исследования, фактор ущербов заслуживает самого пристального изучения и учета состава реципиентов при обосновании направлений инновационной активности.

ущербу принадлежит составляющей, связанной с влиянием на здоровье людей. Эта компонента достигает 75-80% суммарного экологического ущерба от выбросов автотранспорта.⁵³ В приводимых ниже расчетах значения ущерба для здоровья людей приняты по данным, содержащим наиболее подробные оценки.⁵⁴ В этих работах показано, что величина ущерба сильно зависит от конкретной местности, на которой происходит выделение выбросов. Поэтому с целью получения обобщенных *выводов без привязки к конкретным территориям* в прилагаемых расчетах нами был использован следующий подход:

- ущерба на сельской территории имеют минимальное значение коэффициента негативного воздействия, равные 1,
- на территории со средней плотностью населения – 5-10,
- в городах с высокой плотностью населения – 50-100 и более.

В качестве основы для количественных оценок ущербов для здоровья людей от выбросов автомобильным транспортом по отдельным видам загрязнителей приняты значения, приведенные в работе Delucchi⁵⁵ для США по крупным городам (Лос-Анжелес), средним городам и в среднем по территории страны. При этом, понимая, что оценки по США не отражают в полной мере ситуацию в других регионах мира, нами за основу взяты минимальные оценки, которые отнесены к категории ущербов в сельской местности.

Такой подход хотя и вносит в расчеты большую степень условности, однако, в первом приближении достаточно хорошо отражает зависимость ущерба от характера территории, где происходят выбросы загрязняющих веществ. В табл. 6 показаны оценки ущербов для здоровья людей, использованные нами для расчета стоимостной компоненты влияния выбросов автотранспорта на полную стоимость годовой работы (пробега). Условно принято, что *вариант I* соответствует эксплуатации автомобиля в

⁵³Jensen, A.A., et al. Life Cycle Assessment (LCA): A guide to approaches, experiences and information sources. Report to the European Environment Agency. Copenhagen, Denmark, 1997.

⁵⁴McCubbin D.R., Delucchi M.A. The Health Costs of Motor-Vehicle-Related Air Pollution // Journal of Transport Economics and Policy. September 1999. Vol. 33 Part 3. P. 253-286; Thomas C. E. (Sandy), James B.D., Lomax F.D., Jr. and Kuhn I. F. Integrated Analysis of Hydrogen Passenger Vehicle Transportation Pathways // Proceedings of the U.S. DOE Hydrogen Program Review, 1998; Delucchi M. Environmental Externalities of Motor-Vehicle Use in the US, Journal of Transport Economics and Policy, vol. 34, Part 2, May 2000, pp. 135-168; Rabl A., Spadaro V. Health Costs of Automobile Pollution, Revue Francaise d'Allegologie et d'Immunologie Clinique, vol. 40(I), 2000, pp. 55-59; European Commission DG Environment. Damages per tonne emission of PM2.5, NH3, SO2, NOx and VOCs from each EU25 Member State (excluding Cyprus) and surrounding seas, March 2005.

⁵⁵Delucchi M. Environmental Externalities of Motor-Vehicle Use in the US, Journal of Transport Economics and Policy, vol. 34, Part 2, May 2000, pp. 135-168.

загородном цикле и в малых населенных пунктах (на сельской местности), *II*- в средних населенных пунктах и *III*- в крупных городах. При этом предполагается, что выбросы загородной эксплуатации транспорта и все выбросы топливного цикла относятся к территориям категории *I*. Производство оборудования осуществляется в условиях категории *II*, а эксплуатация в городских условиях происходит на зонах категории *III*.

*Таблица 6. Экономическая оценка ущербов для здоровья людей в результате воздействия основных загрязнителей автотранспорта, долл./кгвыбросов **

Виды загрязнителей	Варианты ущербов по территориальным зонам:		
	<i>I (1)</i>	<i>II (5-10)</i>	<i>III (50-100)</i>
VOC	0,175	0,88-1,75	8,75-17,50
CO	0,08	0,09-0,18	0,88-1,75
NO _x	1,93	9,63-19,25	96,25-192,50
PM10	0,47	2,36-4,73	23,63-47,25
PM2.5	5,64	28,18-56,36	281,75-563,5
SO _x	4,90	24,50-49,0	245,00-490,00

* Оценено по данным Todd Litman, *Transportation Cost and Benefit Analysis. Techniques, Estimates and Implications*, Victoria Transport Policy Institute, 17 May 2007, пересчитанным к условиям середины 2010-х гг.),

Приведенные ниже результаты расчетов выполнены при средних значениях ущербов по обозначенным территориям.

Существенный вклад в стоимостную оценку величины ущербов дает учет воздействия выбросов CO₂ на изменение климата. Здесь, как и в оценках других загрязнителей, нет единого мнения.⁵⁶ По разным источникам, оценки ущербов от климатических изменений варьируются от 5 до почти 4000 долл./т CO₂.⁵⁷ На основе анализа большого количества опубликованных материалов рекомендуется использовать три варианта оценки ущербов от выбросов CO₂: *минимальную, среднюю и максимальную* оценку (табл. 7).⁵⁸

⁵⁶ См., например, обзор работ по этому вопросу в Todd Litman (2012). *Climate Change Emission Valuation for Transportation Economic Analysis*. Victoria Transport Policy Institute, http://www.vtpi.org/ghg_valuation.pdf.

⁵⁷ M. Maibach, C. Schreyer, D. Sutter, H.P. van Essen, B.H. Boon, R. Smokers, A. Schroten, C. Doll, B. Pawlowska, M. Bak. *Handbook on Estimation of External Costs in the Transport Sector*, Delft, February 2008.

⁵⁸ Далее в этой статье показаны только два крайних варианта результатов расчета – нижняя оценка (1) и верхняя оценка (3).

Эти диапазоны приняты нами ниже при расчете ущербов от изменения климата в связи с увеличением концентрации в атмосфере парниковых газов.⁵⁹

Таблица 7. Рекомендованные значения для расчета возможного ущерба от выбросов экв.-CO₂ [27]*

	Долл./т CO ₂ **		
	<i>нижняя (1)</i>	<i>средняя (2)</i>	<i>верхняя (3)</i>
2010	9	31	55
2020	21	49	86
2030	27	68	123
2040	27	86	167
2050	25	105	222

* Пересчет парниковых газов к значению экв.-CO₂ произведен с учетом коэффициента *Global-WarmingPotential*, который равен 1 для CO₂, 21 – для CH₄, 310 – для N₂O, 23900 – для SH₆ (M. Maibach, C. Schreyer, D. Sutter, H.P. vanEssen, B.H. Boon, R. Smokers, A. Schroten, C. Doll, B. Pawlowska, M. Bak. Handbook on Estimation of External Costs in the Transport Sector, Delft, February 2008).

** В оригинале величины ущербов даны в Евро (2007). Здесь они приведены к долларам середины 2010-х гг. по *ConsumerPriceIndex*.

3.4. Дополнительные параметры, учитываемые при сопоставлении альтернативных технологий

В расчетах были использованы следующие обобщенные допущения при оценке экономичности пробега транспортных средств:

*Годовой пробег*⁶⁰ – 10 – 15 – 20 тыс. км, в том числе в городском цикле – 70%.

Страховая премия КАСКО – 5% от стоимости авто в год.

⁵⁹ По некоторым работам, принятые оценки ущерба от выбросов парниковых газов являются сильно заниженными. Так, AckermanF., StantonE. ClimateRisksandCarbonPrices: RevisingtheSocialCostofCarbon, Economics: Open-Access, Open-AssessmentE-Journal, vol.6, 2012-10, April 2012 (<http://dx.doi.org/10.5018/economics-journal.ja.2012-10>) на основе углубленного анализа моделей, применяемых для расчетов стоимости ущерба, отмечают, что диапазон оценок для 2050 г. с высокой долей вероятности может составлять 150 – 500 долл./т CO₂ (при максимальной оценке около 1500 долл./т CO₂). Естественно, этот фактор может сильно влиять на эффективность технологий с малыми выбросами CO₂.

⁶⁰Как показали расчеты, эффективность альтернативных технологий сильно зависит от величины годового пробега автомобиля: чем он меньше, тем менее конкурентоспособными являются технологии с высокой стоимостью инвестиций.

Срок службы авто – 15 лет.

Непредвиденные расходы – 2,5% от стоимости авто в год

Эксплуатационные издержки (кроме энергоносителей): электромобиль и водородный автомобиль с ТЭ – 0,5% от стоимости авто в год, авто с ДВС – 1%.

Норма прибыли на инвестиции – 10% в год.

4. Расчет выбросов в атмосферу сравниваемых типов автотранспорта

4.1. Модель GREET

Для полной оценки энергетических и эмиссионных последствий применения передовых транспортных технологий и новых видов транспортного топлива необходимо рассмотреть топливный цикл «от скважины до колеса» и транспортный средства через рекуперацию материалов и удаление транспортных средств. При поддержке управления энергоэффективности и возобновляемых источников энергии Министерства энергетики США Argonne National Laboratory разработала модель полного жизненного цикла трансформации природных энергоресурсов в полезную работу на транспорте. Модель называется GREET (*The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation Model*).⁶¹

Модель GREET разработана в формате MSExcel в виде многомерная электронных таблиц. Она используется для сравнения использования энергии и выбросов в традиционных и передовых технологиях транспортных средств. Модель GREET включает в себя две подмодели, GREET 1, которая содержит в себе сведения о топливном цикле и эксплуатации транспортных средств, и GREET 2, в которой содержатся оценки затраченной энергии и выбросов, в процессе изготовления транспортных средств.

Первая версия модели GREET была выпущена в 1996 году. С тех пор Argonne Lab. продолжает регулярно обновлять и расширять модель. Самые последние версии модели - версия GREET 1 (2019) для анализа топливного цикла и версия GREET 2 (2019) для анализа транспортного цикла. GREET доступна бесплатно для любого пользователя.

Для каждого транспортного средства и топливной системы модель позволяет рассчитывать следующие показатели для более, чем 100 различных

⁶¹ Argonne National Laboratory, Energy Systems. GREET® Model - The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation Model, <https://greet.es.anl.gov/>

вариантов способов получения моторных топлив и более 70 транспортных средств/топливных систем, использующих эти топлива:

- *Потребление энергоресурсов по трем компонентам технологии:* 1) топливный цикл, 2) стадия конечного использования технологии, 3) расходы на стадии производства оборудования (автомобиля). Эти этапы анализа ресурсов GREET показаны на рис. 2.

- *Выбросы парниковых газов (GHG – парниковые газы) в пересчете на CO₂, в основном углекислый газ (CO₂), метан (CH₄) и закись азота (N₂O).*

- *Выбросы прочих загрязняющих веществ:* летучие органические соединения (VOC), окись углерода (CO), оксид азота (NO_x), твердые частицы размером менее 10 мкр (PM₁₀), твердые частицы размером менее 2,5 мкр (PM_{2,5}), черный углерод (сажа) (BC) и оксиды серы (SO_x).

- *Различные типы автомобилей (технологии):* легковые автомобили и легкие грузовые автомобили (вес брутто).

Модель GREET выделяет три стадии потоков энергии и связанных с ними выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при анализе транспортных систем:

- 1) *топливный цикл (Well-to-Pump)* – от скважины до бака автомобиля,
- 2) *эксплуатационный цикл* – непосредственная работа транспортного средства,
- 3) *цикл изготовления автомобиля.*

Ниже на рис. 1-3 показана схема расчетов по модели GREET. На рис.1 изображена общая логика анализа транспортного цикла GREET.

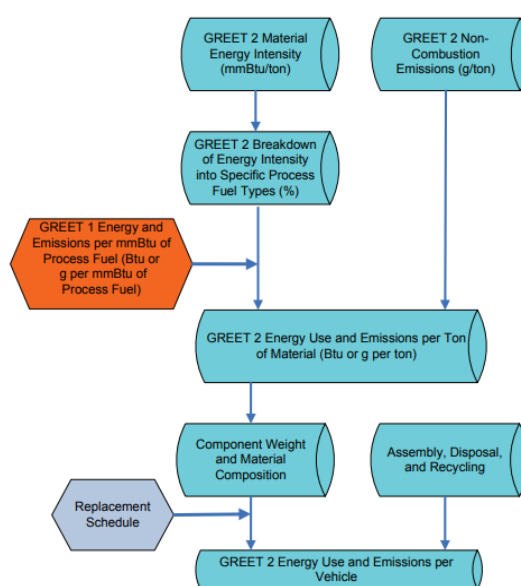


Рис.1 Общая логика анализа транспортного цикла GREET

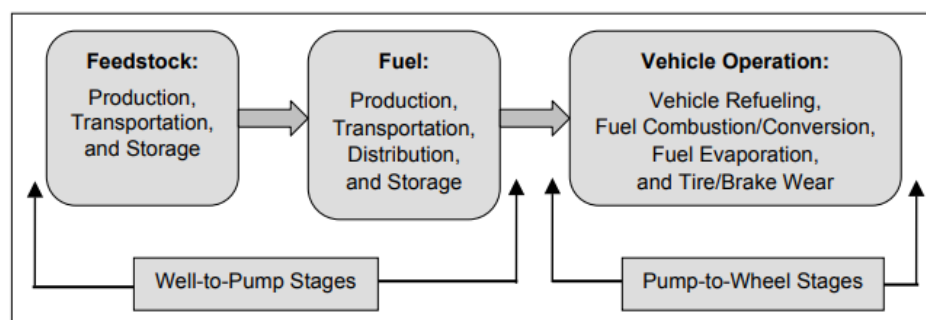


Рис.2 Этапы анализа топливного цикла GREET

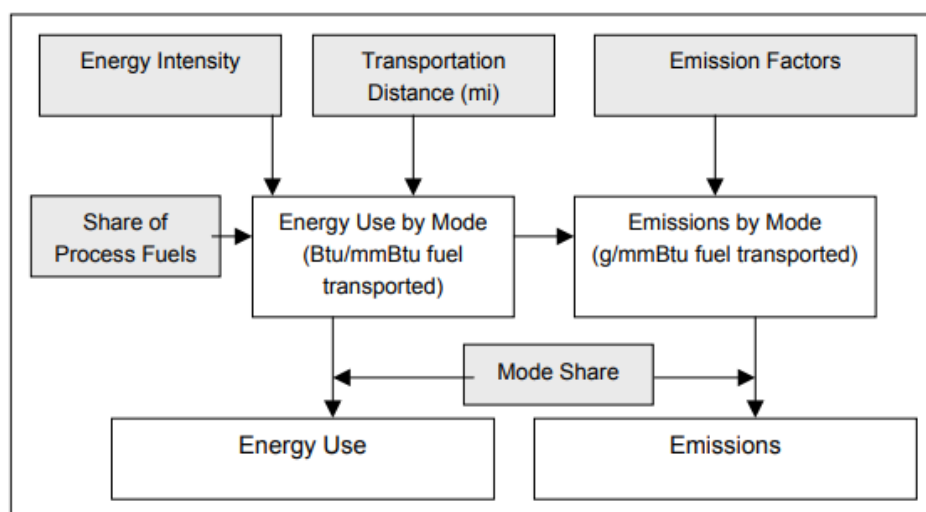


Рис.3 Схема алгоритма расчетов энергии и выбросов загрязняющих веществ

4.2. Расчет выбросов загрязнителей при использовании транспортных технологий⁶²

В табл.8 приведены интегральные показатели расходов энергии и выбросов по трем видам транспортных технологий.

Как следует из табл. 8, из всех типов рассматриваемых в работе технологий наименьший расход энергии на 1 км пути приходится на электромобиль, где он составляет 0,044 кг н.э. на 1 км, что в 1,7 раза меньше, чем у автомобиля с ДВС, и на 20% ниже, чем в автомобиле с ТЭ. Выбросы

⁶²Оценки расходов энергии и выбросов в окружающую среду выполнены Синяком Ю.В. и Боровиковой С.В. применительно к трем рассматриваемым технологиям.

парниковых газов у электромобиля тоже являются наименьшими – 153 г/км против 285 г/км у автомобиля с ДВС и 193 г/км у автомобиля с ТЭ.

Таблица 8. Интегральные показатели расходов энергии и выбросов различными типами легкового автотранспорта

	<i>ДВС</i>	<i>Электромобиль</i>	<i>Авто с ТЭ на Н2 из ПГ</i>
Всего расход энергии (кг н.э./км)	0,076	0,044	0,062
в т.ч. органическое топливо(кг н.э./км)	0,071	0,038	0,059
из него: уголь(кг н.э./км)	0,004	0,022	0,009
природный газ(кг н.э./км)	0,015	0,014	0,048
сырая нефть(кг н.э./км)	0,052	0,002	0,002
<i>Выбросы в атмосферу</i>			
CO2 (VOC, CO, CO2) (г/км)	266,301	143,520	175,253
CH4 (г/км)	0,519	0,295	0,552
N2O (г/км)	0,013	0,002	0,004
GHGs (г/км)	285,380	153,281	193,024
VOC (г/км)	0,350	0,182	0,143
CO (г/км)	1,809	0,138	0,157
NOx (г/км)	0,203	0,115	0,139
PM10 (г/км)	0,033	0,040	0,030
PM2.5 (г/км)	0,017	0,016	0,013
SOx (г/км)	0,155	0,383	0,232

Далее рассматриваются расшифровки расходов энергии и выбросов по элементам жизненного цикла:

- 1) топливный цикл получения энергоносителя (Well-to-Pump),
- 2) производство автомобиля,
- 3) эксплуатация автомобиля (Pump-to-Wheel).

В табл. 9а-9в приведены расчетные значения интегральных расходов энергии и выбросов загрязнителей на 1 км пробега по трем основным технологиям автотранспорта.

видно из табл. 9а, для автомобиля с ДВС полный расход энергии на 1 км пробега достигает 0,076 кг н.э./км. При этом доля топливного цикла (WTP) составляет всего 25%, 10% приходится на изготовление автомобиля, а остальные 65% расходуются при эксплуатации автомобиля. При этом суммарные выбросы парниковых газов достигают около 266 г/км (WTP – 15%, 8% - при изготовлении автомобиля и 77% при его эксплуатации).

У электромобиля полный расход энергии достигает 0,044 кг н.э./км (табл. 9б), из них 50% расходуется в топливном цикле, 19% - при изготовлении электромобиля и 31% при его эксплуатации. Изготовление электромобиля требует на 10-15% больше энергии, чем для ДВС. Суммарные выбросы парниковых газов достигают 153 г/км, в том числе 78% - на стадии WTP, 22% - при изготовлении электромобиля и 0% при его эксплуатации.

Для автомобиля с ТЭ на водороде полный расход энергии на 1 км составляет 0,062 кг н.э., из них 38% расходуется при эксплуатации автомобиля, 21% при его изготовлении и 41% на топливный цикл (WTP) (табл. 9в). Суммарные выбросы парниковых газов составляют около 175г/км (81% выбросов происходят в цикле WTP, 19% при производстве водородного автомобиля и 0% при его эксплуатации).

В табл. 10а-10в даны расходы энергии и выбросы при изготовлении сравниваемых автомобиле в пересчете на жизненный цикл 280 тыс. км (из расчета 15 тыс. км в год за срок эксплуатации около 18-20 лет). Изготовление автомобиля с ДВС требует энергии в размере около 2,200 тн.э. (табл. 9а), из них около 68% расходуется на изготовление компонентов, 17% - на монтаж оборудования и около 1% на производство электробатарей. Выбросы CO₂ на стадии изготовления автомобиля с ДВС достигают 6,2 т CO₂.

Изготовление электромобилей требует практически тех же расходов энергии, что и ДВС, т.е. 2,3 т н.э. на авто (табл. 9б), из них 21% идет на изготовление электроаккумуляторов. Выбросы CO₂ при производстве электромобилей при несколько превышают аналогичные показатели для ДВС (6,7 т CO₂ на авто).

Изготовление водородного автомобиля с ТЭ требует более высоких затрат энергии, чем ДВС и электромобиль, - 3,6 т н.э. при этом из них 85% идет на изготовление компонентов автомобиля. Соответственно, выбросы CO₂ на этом этапе достигают 10,2 т CO₂ на авто.

В табл. 11 приведены данные по изготовлению сравниваемых автомобилей на 1 км пробега. Как видно из данных таблицы, общие расходы

энергии в водородном автомобиле с ТЭ на 15-16% выше, чем в варианте с ДВС и электромобилем, а выбросы CO₂ даже на 52-65% выше.

*Таблица 9а. Интегральные показатели по стадиям жизненного цикла в автомобиле с ДВС,
на 1 км пробега*

Автомобиль с ДВС								
	кг н.э. или г на 1 км				%%			
	Топливны й цикл	Производ- ство авто	Эксплуата ция авто	Всего	Топливный цикл	Производ- ство авто	Эксплуата ция авто	Всего
Всего потребление энергии (кг н.э./км)	0,019	0,008	0,049	0,076	25%	10%	65%	100%
в т.ч. органические топлива(кг н.э./км)	0,018	0,007	0,046	0,071	25%	10%	64%	100%
из них: уголь(кг н.э./км)	0,001	0,003	0,000	0,004	34%	66%	0%	100%
природный газ(кг н.э./км)	0,011	0,003	0,000	0,015	78%	22%	0%	100%
сырая нефть(кг н.э./км)	0,005	0,001	0,046	0,052	10%	3%	87%	100%
Выбросы в атмосферу								
CO2 (VOC, CO, CO2) (г/км)	39,597	20,466	206,238	266,301	15%	8%	77%	100%
CH4 (г/км)	0,461	0,053	0,005	0,519	89%	10%	1%	100%
N2O (г/км)	0,008	0,000	0,005	0,013	59%	3%	37%	100%
GHGs (г/км)	55,425	22,293	207,662	285,380	19%	8%	73%	100%
VOC(г/км)	0,080	0,120	0,149	0,350	23%	34%	43%	100%

CO (г/км)	0,048	0,071	1,690	1,809	3%	4%	93%	100%
NO _x (г/км)	0,104	0,024	0,075	0,203	51%	12%	37%	100%
PM10(г/км)	0,010	0,009	0,015	0,033	29%	27%	44%	100%
PM2.5(г/км)	0,007	0,004	0,006	0,017	40%	25%	35%	100%
SO _x (г/км)	0,064	0,088	0,003	0,155	41%	57%	2%	100%

*Таблица 9б. Интегральных показатели по этапам жизненного цикла в электромобиле,
на 1 км пробега*

Электромобиль								
	кг н.э. или г на 1 км				%%			
	Топливный цикл	Производ- ство авто	Эксплуата- ция авто	Всего	Топливный цикл	Производ- ство авто	Эксплуата- ция авто	Всего
Всего потребление энергии (кг н.э./км)	0,022	0,008	0,014	0,044	50%	19%	31%	100%
в т.ч. органические топлива (кг н.э./км)	0,018	0,007	0,012	0,038	49%	20%	31%	100%
из них: уголь (кг н.э./км)	0,010	0,003	0,009	0,022	46%	13%	42%	100%
природный газ (кг н.э./км)	0,008	0,004	0,002	0,014	56%	27%	17%	100%
сырая нефть (кг н.э./км)	0,001	0,001	0,000	0,002	34%	47%	19%	100%
Выбросы в атмосферу								
CO2 (VOC, CO, CO2) (г/км)	111,718	31,802	0,000	143,520	78%	22%	0%	100%
CH4 (г/км)	0,214	0,081	0,000	0,295	73%	27%	0%	100%
N2O (г/км)	0,002	0,001	0,000	0,002	72%	28%	0%	100%
GHGs (г/км)	118,610	34,671	0,000	153,281	77%	23%	0%	100%
VOC(г/км)	0,012	0,170	0,000	0,182	7%	93%	0%	100%

CO(г/км)	0,036	0,102	0,000	0,138	26%	74%	0%	100%
NO _x (г/км)	0,078	0,037	0,000	0,115	68%	32%	0%	100%
PM10(г/км)	0,015	0,014	0,011	0,040	36%	36%	28%	100%
PM2.5(г/км)	0,006	0,007	0,003	0,016	39%	44%	18%	100%
SO _x (г/км)	0,205	0,178	0,000	0,383	54%	46%	0%	100%

*Таблица 9в. Интегральные показатели по стадиям жизненного цикла в автомобиле с ТЭ на Н2 из природного газа,
на 1 км пробега*

Авто с ТЭ на Н2 из ПГ								
	кг н.э. или г на 1 км				%%			
	Топливны й цикл	Производ- ство авто	Эксплуата -ция авто	Всего	Топливн ый цикл	Производ- ство авто	Эксплуата -ция авто	Всего
Всего потребление энергии (кг н.э./км)	0,026	0,013	0,023	0,062	41%	21%	38%	100%
в т.ч. органические топлива (кг н.э./км)	0,024	0,012	0,023	0,059	40%	20%	40%	100%
из них: уголь (кг н.э./км)	0,006	0,004	0,000	0,009	61%	39%	0%	100%
природный газ (кг н.э./км)	0,017	0,007	0,023	0,048	37%	14%	49%	100%
сырая нефть (кг н.э./км)	0,000	0,001	0,000	0,002	24%	76%	0%	100%
Выбросы в атмосферу								
CO2 (VOC, CO, CO2) (г/км)	141,379	33,874	0,000	175,253	81%	19%	0%	100%
CH4 (г/км)	0,463	0,089	0,000	0,552	84%	16%	0%	100%
N2O (г/км)	0,003	0,001	0,000	0,004	80%	20%	0%	100%
GHGs (г/км)	156,103	36,921	0,000	193,024	81%	19%	0%	100%
VOC (г/км)	0,022	0,121	0,000	0,143	16%	84%	0%	100%

CO(г/км)	0,071	0,086	0,000	0,157	45%	55%	0%	100%
NO _x (г/км)	0,101	0,038	0,000	0,139	73%	27%	0%	100%
PM10(г/км)	0,007	0,012	0,011	0,030	23%	39%	38%	100%
PM2.5(г/км)	0,004	0,005	0,003	0,013	34%	43%	23%	100%
SO _x (г/км)	0,079	0,153	0,000	0,232	34%	66%	0%	100%

Таблица 10а. Потребление энергии и выбросы *при изготовлении* автомобиля с ДВС, на 1 автомобиль*

ДВС										
	кг н.э.иликг за жизненный цикл авто					%%				
	Компонен- ты	Монтаж	Батареи	Жидкос- ти	Всего	Компонен- ты	Монтаж	Батареи	Жидкос- ти	Всего
Всего потребление энергии (кг н.э./км)	1480,319	373,679	19,956	302,504	2176,459	68%	17%	1%	14%	100%
в т.ч. органические топлива (кг н.э./км)	1355,535	334,732	19,104	300,140	2009,510	67%	17%	1%	15%	100%
из них: уголь (кг н.э./км)	624,389	106,199	9,589	6,534	746,710	84%	14%	1%	1%	100%
природный газ (кг н.э./км)	575,073	223,670	7,776	76,087	882,607	65%	25%	1%	9%	100%
сырая нефть (кг н.э./км)	156,073	4,863	1,738	217,519	380,194	41%	1%	0%	57%	100%
Выбросы в атмосферу										
CO2 (кг)	3845,708	966,262	36,872	686,401	5535,243	69%	17%	1%	12%	100%

CO2 (VOC, CO, CO2) (кг)	3886,678	972,472	37,013	773,897	5670,060	69%	17%	1%	14%	100%
CH4 (кг)	10,289	2,358	0,200	1,931	14,778	70%	16%	1%	13%	100%
N2O (кг)	0,085	0,021	0,001	0,016	0,123	69%	17%	1%	13%	100%
GHGs (кг)	4248,048	1048,831	43,213	836,084	6176,176	69%	17%	1%	14%	100%
VOC (кг)	3,613	1,735	0,024	27,898	33,270	11%	5%	0%	84%	100%
CO (кг)	18,906	0,510	0,042	0,349	19,807	95%	3%	0%	2%	100%
NOx(кг)	4,406	0,864	0,053	1,352	6,675	66%	13%	1%	20%	100%
PM10(кг)	2,055	0,162	0,052	0,237	2,506	82%	6%	2%	9%	100%
PM2.5(кг)	0,948	0,086	0,025	0,114	1,173	81%	7%	2%	10%	100%
SOx(кг)	18,459	1,197	0,607	4,070	24,333	76%	5%	2%	17%	100%

Таблица 106. Потребление энергии и выбросы *при изготовлении* электромобиля, на 1 электромобиль*

Электромобиль										
	кг н.э.или кг за жизненный цикл авто					%%				
	Компонен- ты	Монтаж	Батареи	Жидкос- ти	Всего	Компонен- ты	Монтаж	Батареи	Жидкос- ти	Всего
Total energy (кгн.э.)	1382,815	373,679	491,497	69,573	2317,563	60%	16%	21%	3%	100%
Fossil fuels (кгн.э.)	1260,140	334,732	426,609	68,399	2089,881	60%	16%	20%	3%	100%
Coal (кгн.э.)	551,330	106,199	123,387	3,355	784,270	70%	14%	16%	0%	100%
Natural gas (кгн.э.)	556,582	223,670	245,573	46,003	1071,828	52%	21%	23%	4%	100%
Petroleum (кгн.э.)	152,228	4,863	57,650	19,042	233,783	65%	2%	25%	8%	100%
Выбросы в атмосферу										
CO2 (кг)	3738,663	966,262	1212,118	116,728	6033,770	62%	16%	20%	2%	100%
CO2 (VOC, CO, CO2) (кг)	3777,440	972,472	1214,592	202,819	6167,323	61%	16%	20%	3%	100%
CH4 (кг)	9,701	2,358	3,070	0,601	15,730	62%	15%	20%	4%	100%
N2O (кг)	0,083	0,021	0,024	0,005	0,133	62%	16%	18%	4%	100%
GHGs (кг)	4117,814	1048,831	1334,890	222,141	6723,677	61%	16%	20%	3%	100%
VOC (кг)	3,229	1,735	0,371	27,552	32,888	10%	5%	1%	84%	100%

CO (кг)	18,272	0,510	0,838	0,140	19,761	92%	3%	4%	1%	100%
NOx (кг)	4,385	0,864	1,714	0,192	7,154	61%	12%	24%	3%	100%
PM10 (кг)	1,881	0,162	0,707	0,036	2,787	68%	6%	25%	1%	100%
PM2.5 (кг)	0,870	0,086	0,415	0,015	1,386	63%	6%	30%	1%	100%
SOx (кг)	24,519	1,197	8,253	0,540	34,509	71%	3%	24%	2%	100%

Таблица 10в. Потребление энергии и выбросы *при изготовлении* автомобиля с ТЭ на Н2 из природного газа, на 1 автомобиль*

<i>Авто с ТЭ на Н2 из ПГ</i>										
	кг н.э.или кг за жизненный цикл авто					%%				
	Компоненты	Монтаж	Батареи	Жидкости	Всего	Компоненты	Монтаж	Батареи	Жидкости	Всего
Total energy (кгн.э.)	3033,567	373,679	107,409	69,573	3584,227	85%	10%	3%	2%	100%
Fossil fuels (кгн.э.)	2786,639	334,732	98,636	68,399	3288,406	85%	10%	3%	2%	100%
Coal (кгн.э.)	888,355	106,199	34,361	3,355	1032,269	86%	10%	3%	0%	100%
Natural gas (кгн.э.)	1580,838	223,670	51,087	46,003	1901,598	83%	12%	3%	2%	100%
Petroleum (кгн.э.)	317,446	4,863	13,188	19,042	354,539	90%	1%	4%	5%	100%
<i>Выбросы в атмосферу</i>										
CO2 (кг)	7911,216	966,262	248,624	116,728	9242,830	86%	10%	3%	1%	100%
CO2 (VOC, CO, CO2) (кг)	7959,692	972,472	249,654	202,819	9384,637	85%	10%	3%	2%	100%
CH4 (кг)	20,907	2,358	0,801	0,601	24,667	85%	10%	3%	2%	100%
N2O (кг)	0,187	0,021	0,007	0,005	0,220	85%	10%	3%	2%	100%
GHGs (кг)	8671,987	1048,831	285,753	222,141	10228,712	85%	10%	3%	2%	100%

VOC (кг)	4,134	1,735	0,091	27,552	33,512	12%	5%	0%	82%	100%
CO (кг)	22,650	0,510	0,474	0,140	23,775	95%	2%	2%	1%	100%
NO _x (кг)	8,873	0,864	0,522	0,192	10,451	85%	8%	5%	2%	100%
PM10 (кг)	2,878	0,162	0,190	0,036	3,267	88%	5%	6%	1%	100%
PM2.5 (кг)	1,294	0,086	0,091	0,015	1,486	87%	6%	6%	1%	100%
SO _x (кг)	30,265	1,197	10,304	0,540	42,306	72%	3%	24%	1%	100%

*Таблица 11. Суммарные расходы энергии и выбросы **при изготовлении** сравниваемых автомобилей,
на 1 км пробега в течение жизненного цикла*

	<i>ДВС</i>	<i>Электромобиль</i>	<i>Авто ТЭ на Н2 из ПГ</i>
Пробег за жизненный цикл, (км)	280000,00	280000,00	280000,00
Всего энергии (кгн.э./км)	0,008	0,008	0,013
в т.ч. органические топлива(кгн.э./км)	0,007	0,007	0,012
из них:			
уголь(кгн.э./км)	0,003	0,003	0,004
природный газ(кгн.э./км)	0,003	0,004	0,007
сырая нефть(кг н.э./км)	0,001	0,001	0,001
<i>Выбросы в атмосферу</i>			
CO2 (VOC, CO, CO2) (г/км)	20,250	22,02615	33,51656
CH4 (г/км)	0,053	0,056179	0,088096
N2O (г/км)	0,000	0,000475	0,000786
GHGs (г/км)	22,058	24,01313	36,53111
VOC (г/км)	0,119	0,117457	0,119686
CO (г/км)	0,071	0,070575	0,084911
NOx (г/км)	0,024	0,02555	0,037325
PM10 (г/км)	0,009	0,009954	0,011668
PM2.5 (г/км)	0,004	0,00495	0,005307
SOx (г/км)	0,087	0,123246	0,151093

Таблица 12. Потребление энергии и выбросы *при эксплуатации* сравниваемых автомобилей, на 1 км пробега

	<i>ДВС на бензине</i>	<i>Электромобиль</i>	<i>ТЭ на газ. Н2 из ПГ</i>
Доля эксплуатации в городском цикле	0,70	0,70	0,70
Уд. расход топлива (л/100 км)	6,563	1,817	3,124
Полный расход топлива (кг н.э./км)	0,049	0,014	0,023
в т.ч. органические топлива (кг н.э./км)	0,046	0,012	0,023
из них:			
уголь (кг н.э./км)	0,000	0,009	0,000
природный газ (кг н.э./км)	0,000	0,002	0,023
сырая нефть (кг н.э./км)	0,046	0,000	0,000
<i>Выбросы в атмосферу</i>			
CO2 (г/км)	146,284	0,000	0,000
CH4 (г/км)	0,005	0,000	0,000
N2O (г/км)	0,005	0,000	0,000
GHGs (г/км)	150,828	0,000	0,000
VOC: (г/км)	0,149	0,000	0,000
CO (г/км)	1,690	0,000	0,000
NOx (г/км)	0,075	0,000	0,000
PM10 (г/км)	0,014	0,011	0,011

PM2.5 (г/км)	0,003	0,000	0,000
SOx (г/км)	0,002	0,000	0,000

На этапе эксплуатации электромобиль и водородный автомобиль с ТЭ являются наиболее чистыми, т.к. имеют практически нулевые выбросы в атмосферу (табл. 12). На их фоне автомобиль с ДВС характеризуется значительными выбросами (150 г/км для парниковых газов).

5. Оценка эффективности сравниваемых транспортных средств

Для проведения расчетов конкурентоспособности различных технологий легкового автотранспорта Синяком Ю.В. и Петровым В.Ю., в 2005-2010 гг. была разработана в форматах MS Excel развернутая модель расчета стоимости пробега автомобиля, опирающаяся на результаты технических и экологических расчетов, выполненных по модели GREET. В последующие годы эта модель несколько раз совершенствовалась и уточнялась. Последние разработки модели были изложены в работе С.В. Боровиковой, выполненной под руководством Ю.В. Синяком в 2019 г.⁶³

Ниже представлены результаты расчетов по трем технологиям автотранспорта (ДВС, электромобиль и водородный автомобиль с ТЭ) для исходных данных, изложенных в разделе 3.

5.1. ДВС

Расчеты показывают, что экономичность "базовой" технологии на основе ДВС скорее всего будет медленно ухудшаться за счет некоторого увеличения стоимости автомобилей в связи с ожидаемыми технологическими новациями, как переход на автоматическое управление движением, ужесточением контроля за выбросами в окружающую среду, использование рекуперативных тормозов и т.п., несмотря на ожидаемое снижение удельных расходов топлива на 35% в период с 2020 до 2040 гг. (см. табл. 2). При этом стоимость пробега будет сильно зависеть от величины годового пробега.

На рис. 4 показана ожидаемая динамика изменения стоимости пробега автомобиля с ДВС при годовом пробеге от 10 до 20 тыс. км. При относительно малых расстояниях (10 тыс. км) стоимость пробега возрастает с 35 долл./100 км до 39-41 долл./100 км. При пробеге в 20 тыс. км затраты растут с 20-21 долл./100 км в настоящее время до 24-26 долл./100 км. Увеличение годового пробега на каждые 5 тыс. км приводит к заметному сокращению

⁶³Боровикова С.В. "Оценка экономичности различных энергоносителей и транспортных средств в легковом пассажирском автотранспорте", Бакалаврская диссертация по кафедре сакроэкономики МФТИ (научный руководитель Синяк Ю.В.), Москва, 2019.

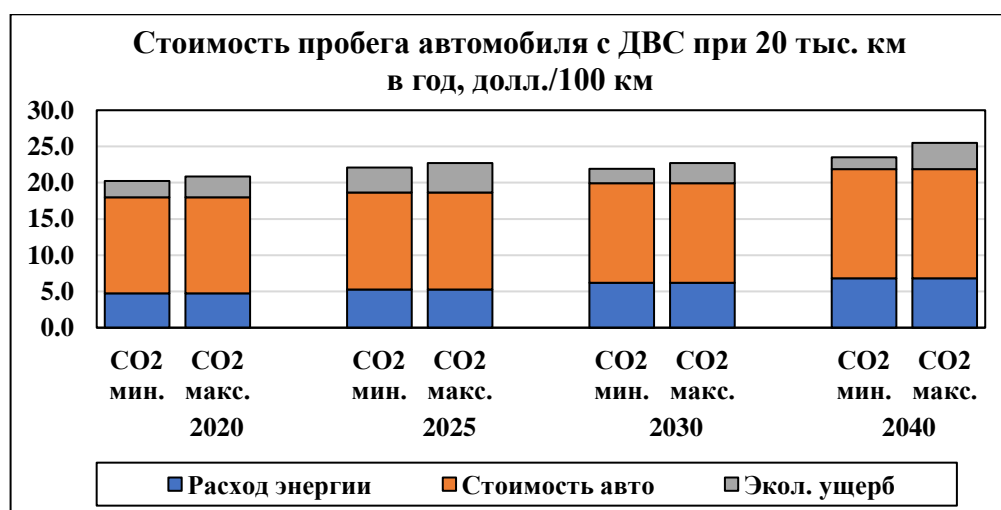
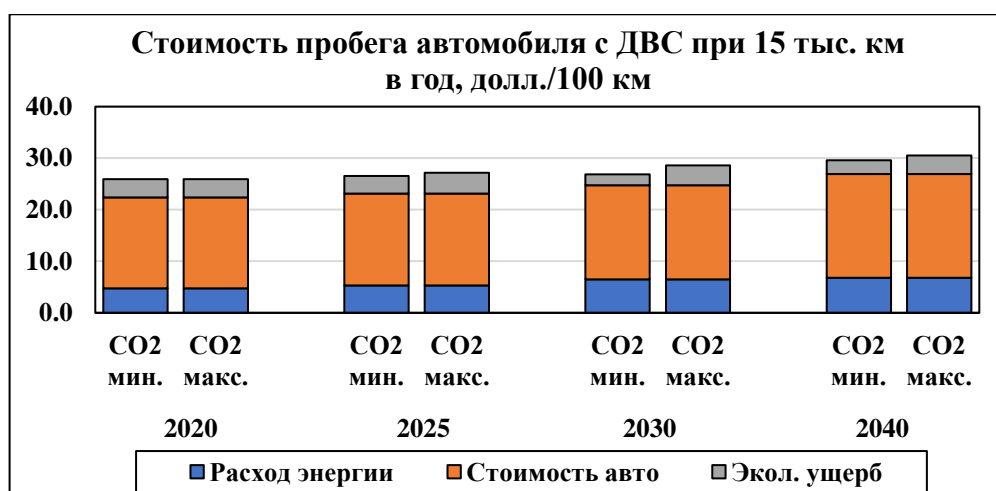
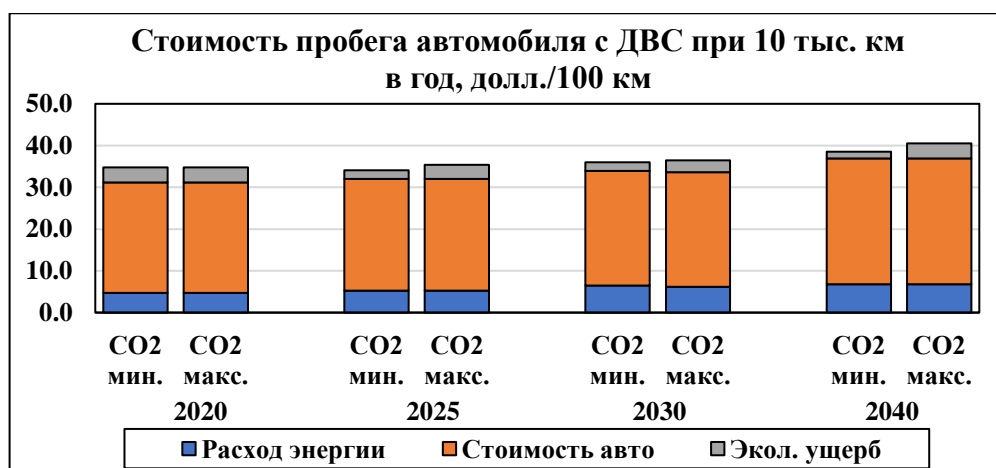


Рис. 4. Прогноз изменения стоимости пробега автомобилей с ДВС при минимальных и максимальных оценках ущерба от выбросов CO₂ и годовом пробеге от 10 до 20 тыс. км

стоимости пробега (на 25% при увеличении пробега с 10 тыс. до 15 тыс. км и на 18% при дальнейшем росте пробега до 20 тыс. км). Одновременно растет доля стоимости экологического ущерба в общих затратах с 10% при пробеге в 10 тыс. км до 11-14% при 20 тыс. км. Абсолютное значение экологического ущерба изменяется мало, а основная величина ущерба приходится на стадию эксплуатации автомобиля.

5.2. Электромобиль

В течение рассматриваемого периода затраты электромобиля заметно сокращаются. При этом здесь решающее значение имеют два фактора: увеличение величины пробега и изменение экономических характеристик электромобиля. Так, для электромобилей при круглосуточной зарядке увеличение пробега в настоящее время с 10 тыс. км до 20 тыс. км в год приводит к снижению затрат с 48 долл./100 км до 25 долл./100 км, т.е. почти на 50% , то к 2020 г. это соотношение снижается от 33-34 долл./100 км до 20-23 долл./100 км, т.е. до 30-33%. Основную роль в этом процессе играет снижение стоимости электромобиля. Использование ночной зарядки аккумуляторов также способствует сокращению затрат, хотя влияние этого фактора существенно ниже по сравнению со снижением стоимости самого электромобиля. В период 2030-2040 гг. стоимость пробега электромобиля становится заметно ниже, чем в авто с ДВС (на 15-25% в зависимости от величины годового пробега). Использование дешевой электроэнергии во время ночной зарядки позволяет снизить затраты на электромобилях 14-16%.

Стоимость экологического ущерба для электромобиля увеличивается незначительно: с 1,5 долл./100 км в 2020 г. до 2 долл./100 км к 2040 г. В отличие от авто с ДВС экологический ущерб от электромобиля приходится в основном на топливный цикл и производство электромобиля, т.е. условно в районах с меньшей плотностью населения, чем в городской среде, где происходит основная эксплуатация электромобиля.

5.3. Водородный автомобиль с топливным элементом

Для этой технологии характерны те же тенденции, что и для электромобиля. На фоне прогнозируемого сокращения стоимости новых водородных автомобилей (см. табл. 5) ожидается заметное сокращение затрат: с 60-62 долл./100 км при 10 тыс. км пробега до 36-39 долл./100 км. Увеличение пробега заметно снижает затраты. При пробеге 20 тыс. км в год затраты для

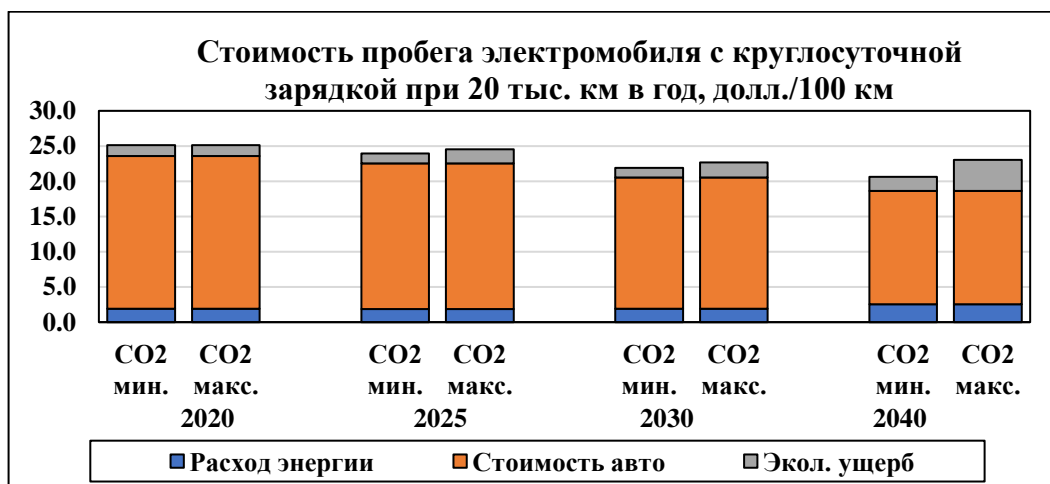
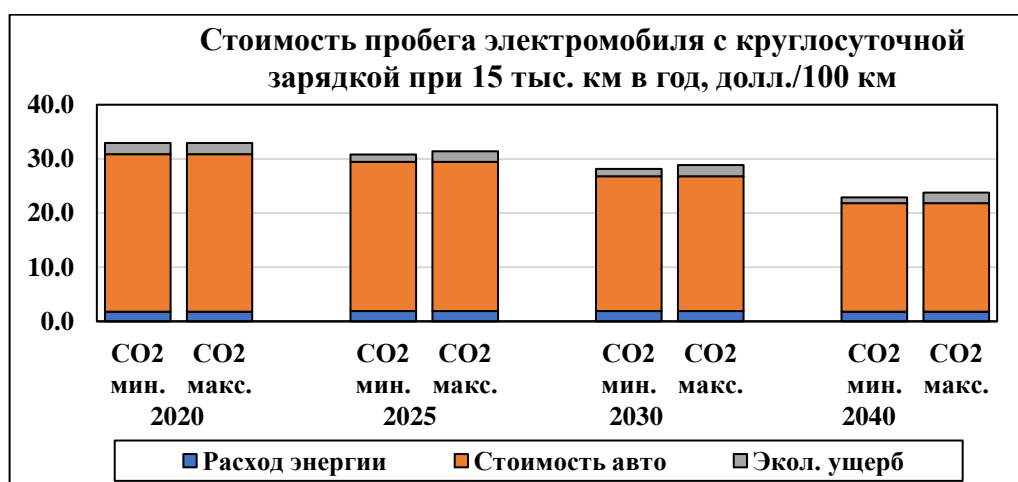
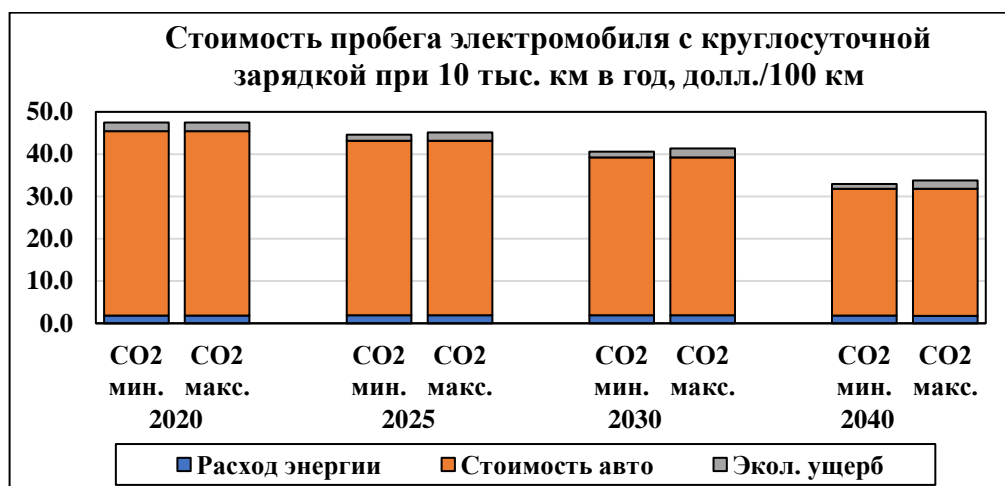


Рис. 5. Прогноз изменения стоимости пробега электромобилей при круглосуточной зарядке аккумуляторов, минимальных и максимальных оценках ущербов от выбросов CO₂ и годовом пробеге от 10 до 20 тыс. км

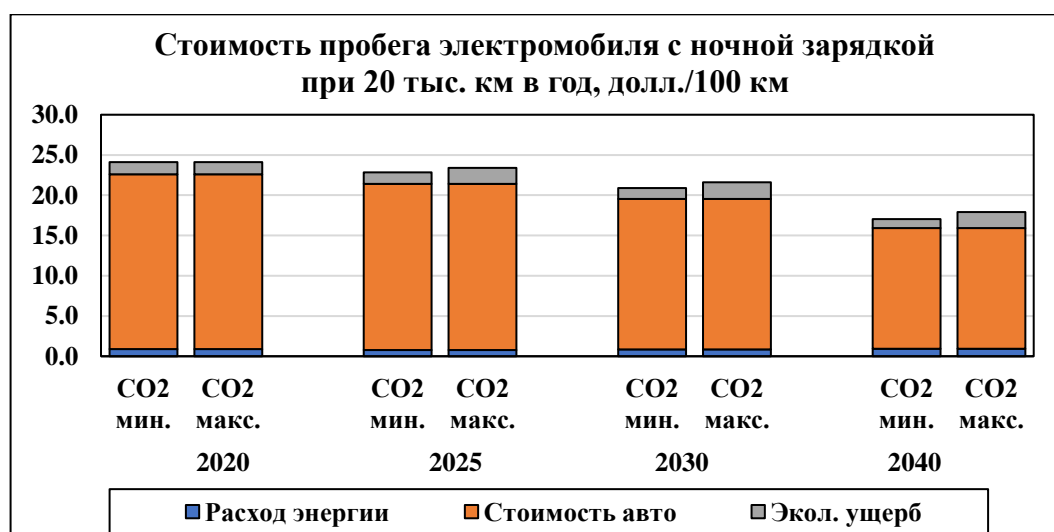
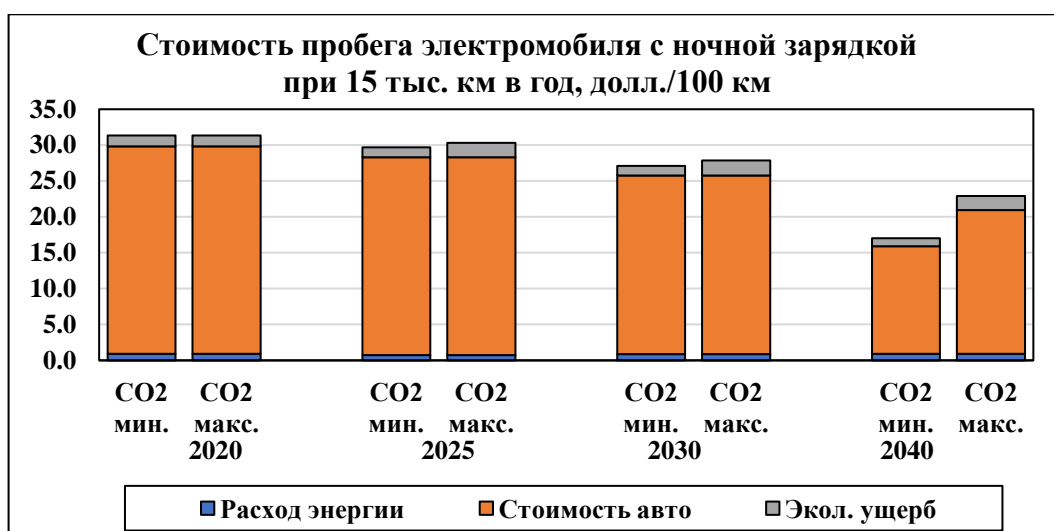
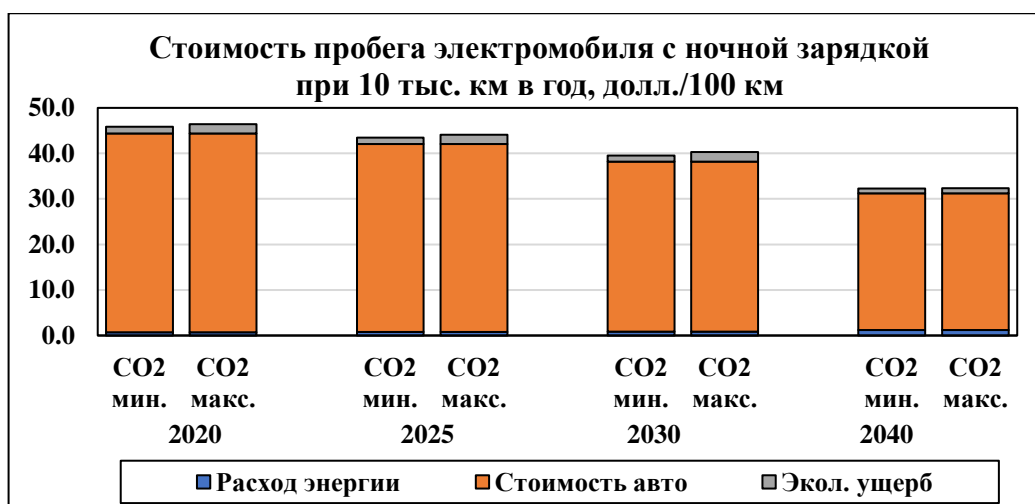


Рис. 6. Прогноз изменения стоимости пробега электромобилей при ночной зарядке аккумуляторов, минимальных и максимальных оценках ущерба от выбросов CO₂ и годовом пробеге от 10 до 20 тыс. км

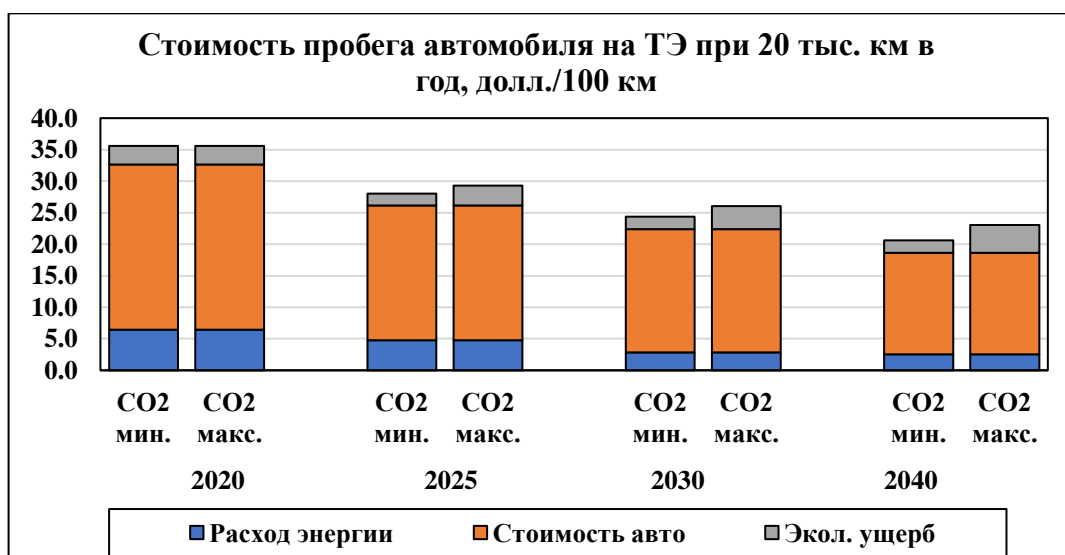
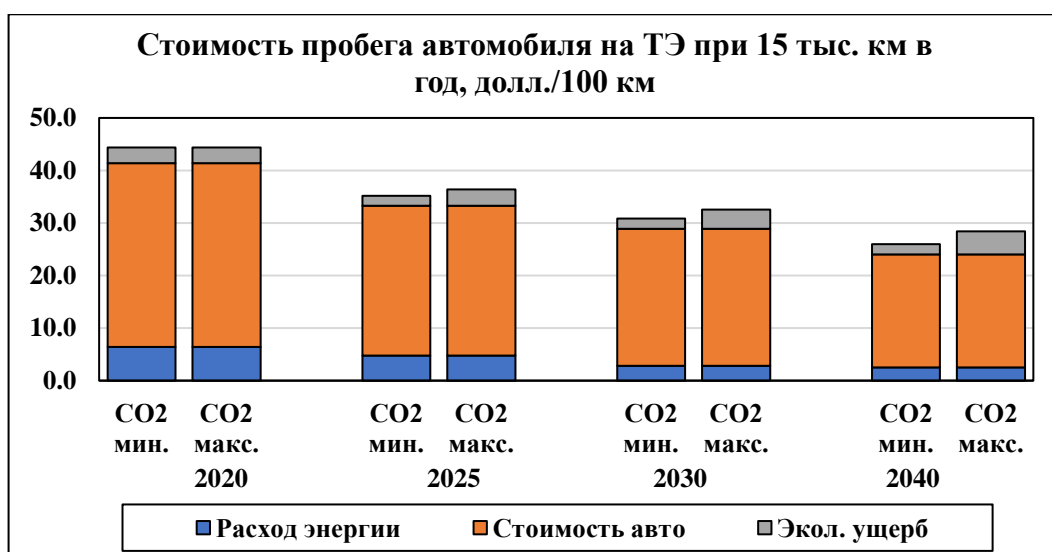
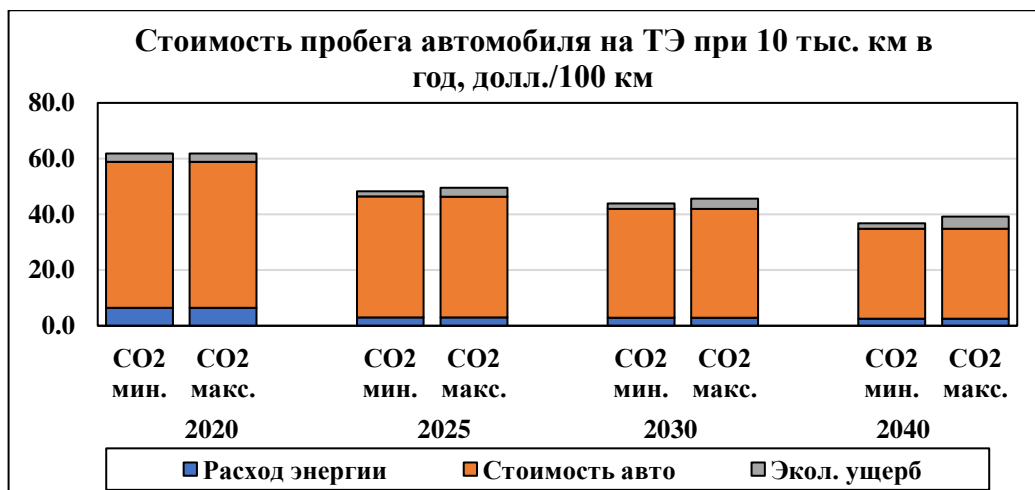


Рис. 7. Прогноз изменения стоимости пробега водородного автомобиля при минимальных и максимальных оценках ущерба от выбросов CO₂ и годовом пробеге от 10 до 20 тыс. км

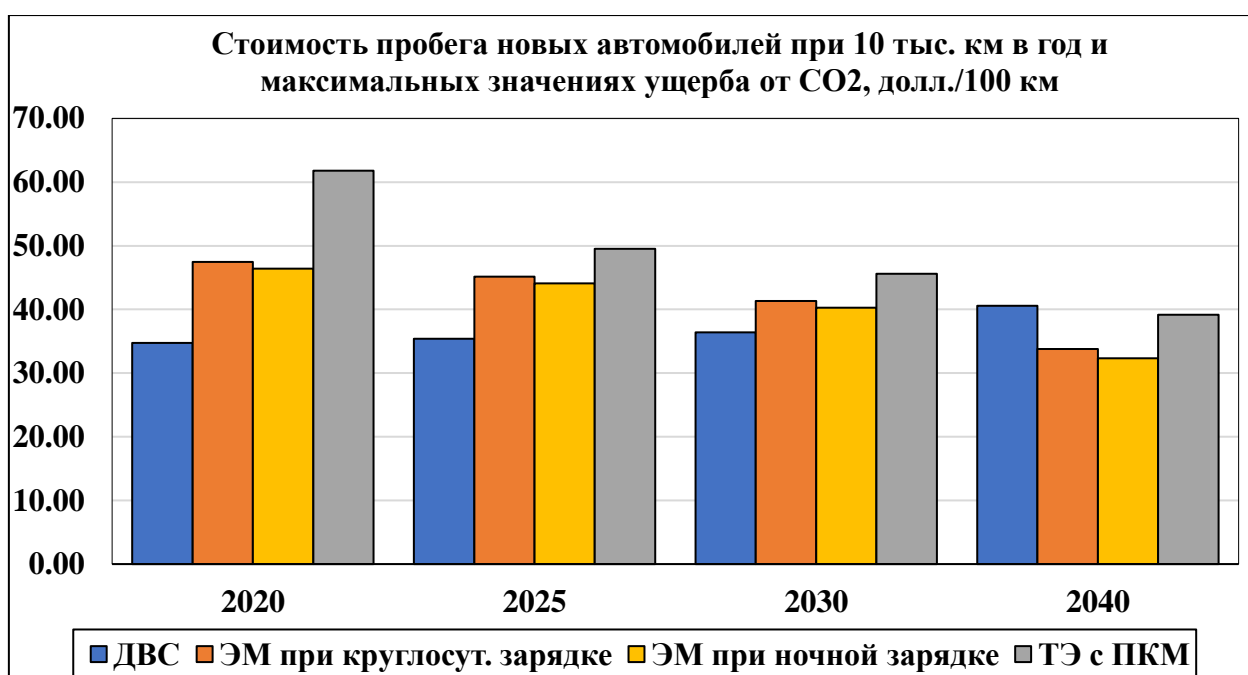
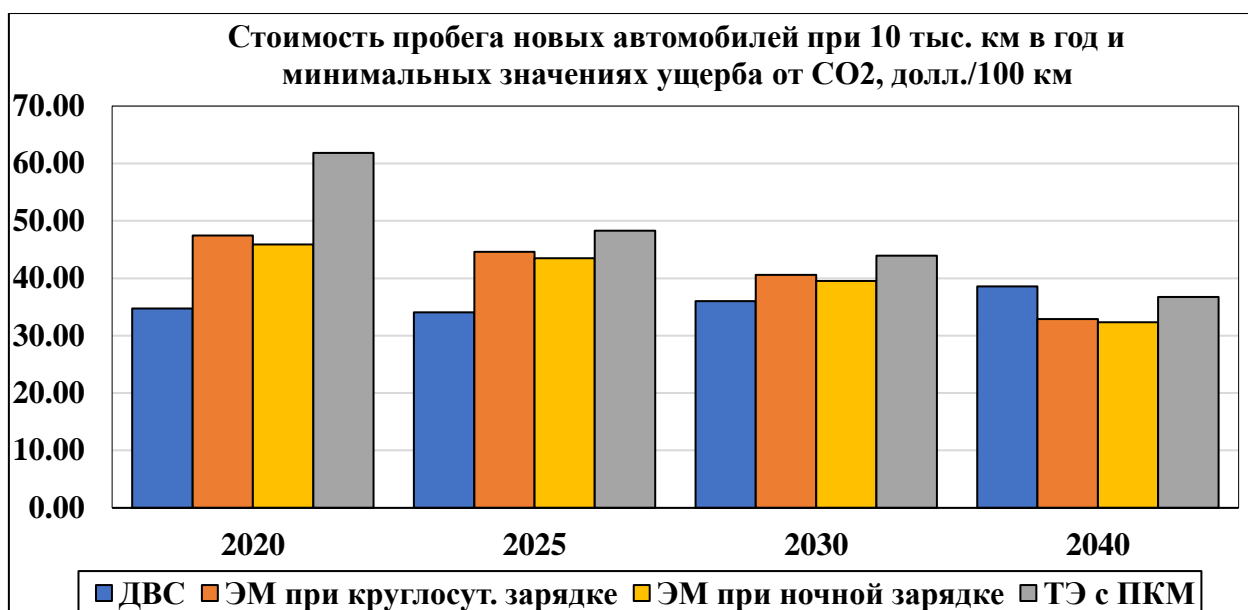


Рис. 8. Сравнительная оценка экономичности технологий автотранспорта при минимальных и максимальных оценках ущерба от выбросов CO₂ и годовом пробеге 10 тыс. км

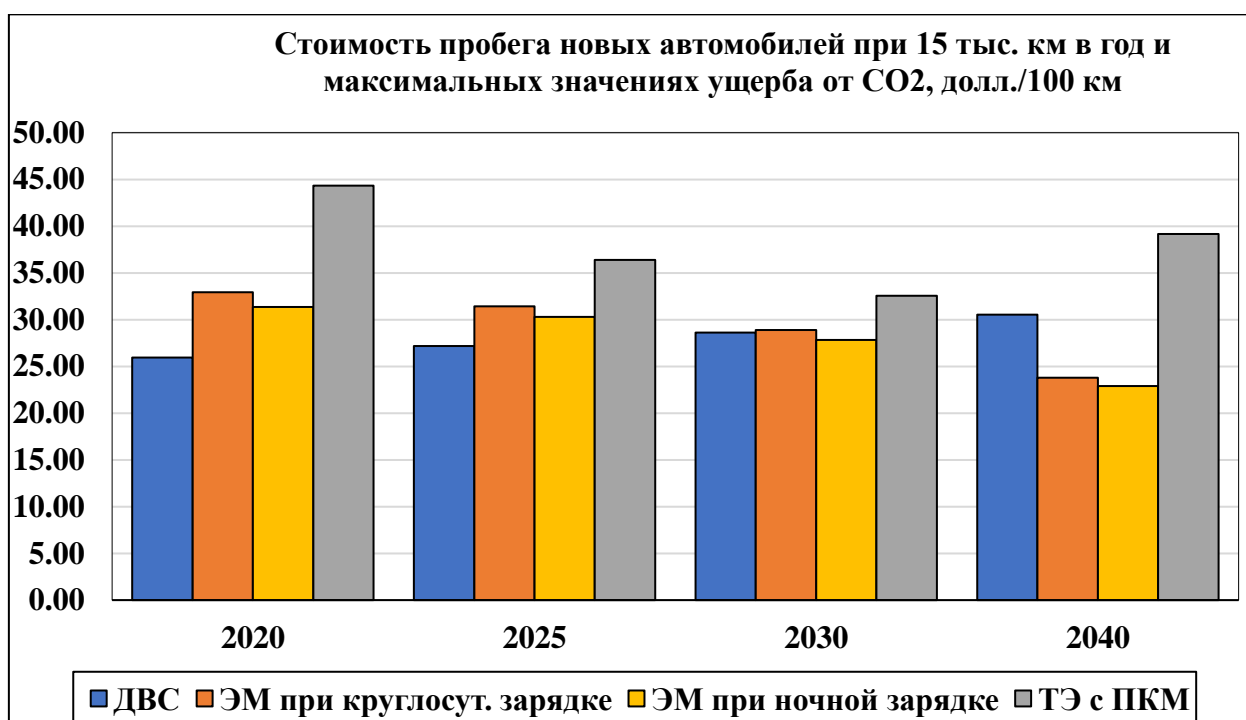
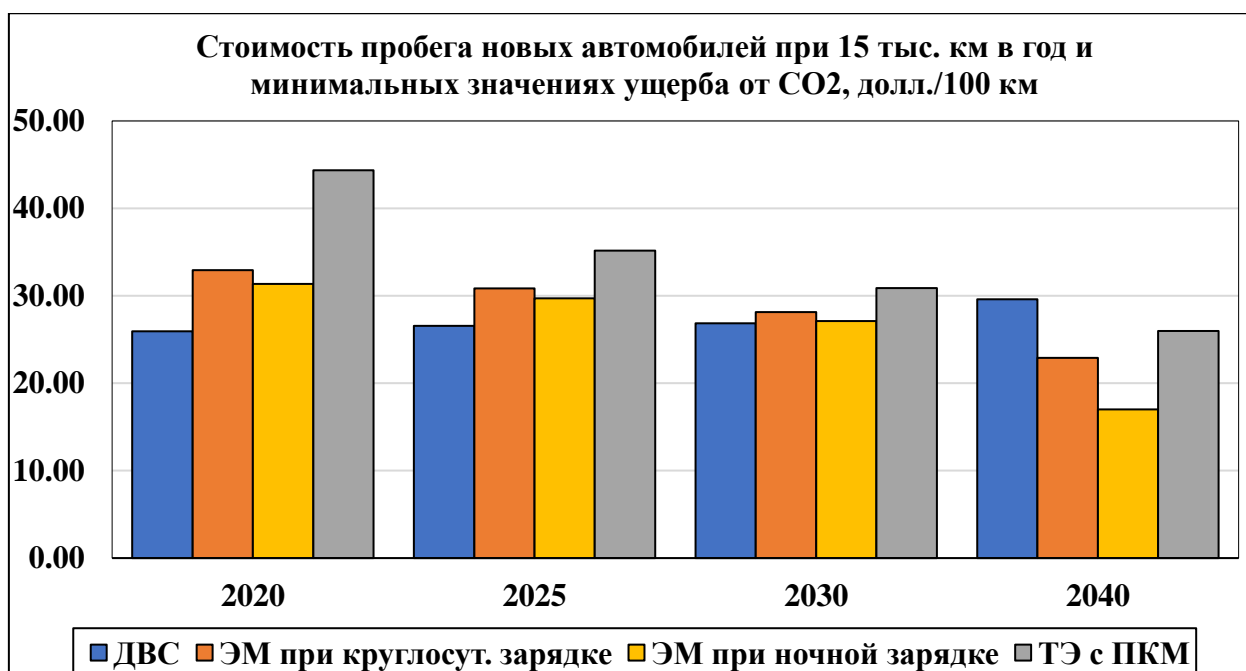


Рис. 9. Сравнительная оценка экономичности технологий автотранспорта при минимальных и максимальных оценках ущерба от выбросов CO₂ и годовом пробеге 15 тыс. км

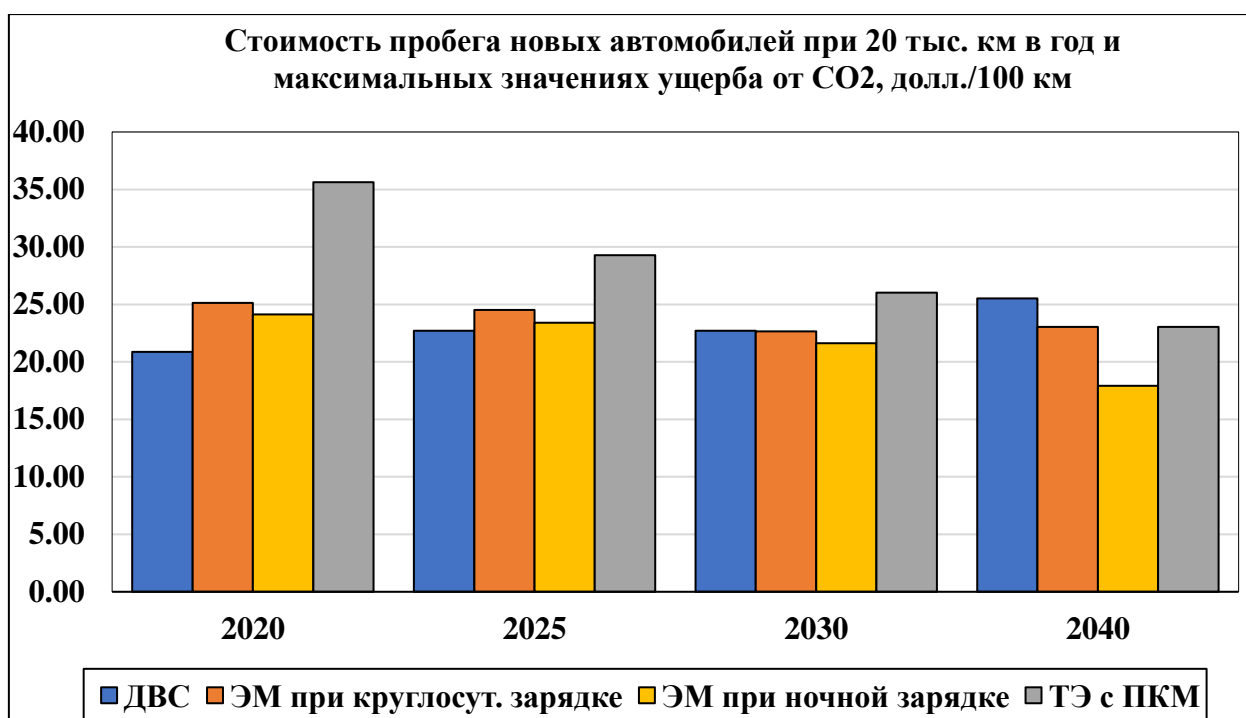
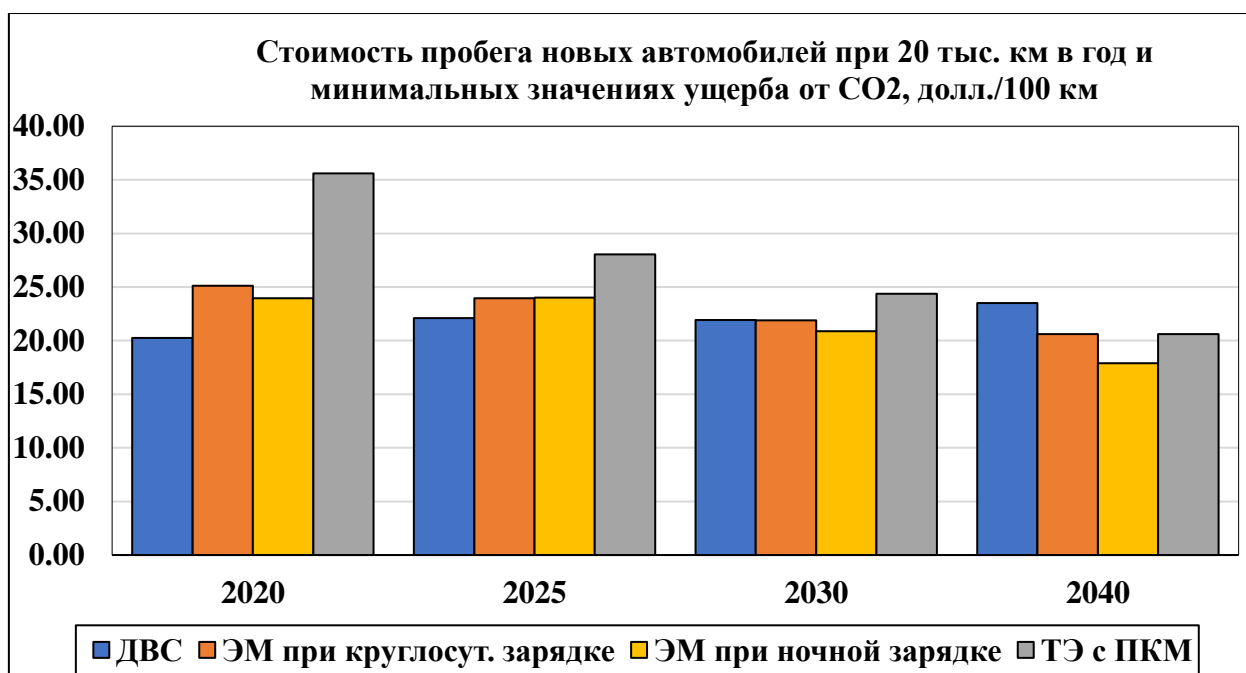


Рис. 10. Сравнительная оценка экономичности технологий автотранспорта при минимальных и максимальных оценках ущерба от выбросов CO₂ и годовом пробеге 20 тыс. км

водородного автомобиля сокращаются с 36 долл./100 км в настоящее время до 20-23 долл./100 км к 2040 г., т.е. оказываются ниже, чем для ДВС при тех же величинах годового пробега. Хотя вполне вероятно, что на протяжении рассматриваемой перспективы водородный автомобиль будет уступать по экономичности электромобилю.

6. Выводы

Сравнение традиционных и альтернативных технологий автотранспорта показывает, что все они имеют положительные и отрицательные стороны:

- автомобиль на базе ДВС:

плюсы – технология хорошо освоена, развитая инфраструктура,

минусы – дорожающее топливо, высокие выбросы в окружающую среду, возможности экономии энергии почти исчерпаны.

- электромобиль:

плюсы – технология быстро развивается в сторону снижения стоимости электромобиля, отсутствие выбросов при использовании (особенно в городской среде), бесшумность хода, отличные тяговые характеристики, возможность использования различных топлив для генерирования электроэнергии,

минусы – неразвитая инфраструктура, длительное время зарядки аккумуляторов, ограниченное число циклов разрядки/зарядки аккумулятора, наличие выбросов в топливном цикле и при производстве электромобиля, ограниченный пробег в связи с низкой энергетической емкостью электроаккумулятора по сравнению с топливным баком в авто с ДВС, требуется синхронизация технологии с работой энергосистемы

- автомобиль с ТЭ на водороде:

плюсы – технология быстро развивается в сторону снижения стоимости топливного элемента, получения, транспорта и хранения водорода, отсутствие выбросов в городской среде, широкая гамма способов получения водорода,

минусы – одновременное использование трех новых технологий – получение водорода, использование водорода в топливном элементе и хранение газообразного или сжиженного водорода создает серьезные трудности в организации продвижения этой технологии на рынок, повышенная опасность систем с водородом, отсутствие инфраструктуры (производство, транспорт, хранение).

Расчеты показывают, что для автомобиля с ДВС полный расход энергии, включая топливный цикл, эксплуатацию автомобиля и его производство, на 1 км пробега достигает 0,076 кг н.э./км. При этом доля топливного цикла (WTP) составляет всего 25%, 10% приходится на изготовление автомобиля, а остальные 65% расходуются при эксплуатации автомобиля. При этом суммарные выбросы парниковых газов достигают около 266 г/км (WTP – 15%, 8% - при изготовлении автомобиля и 77% при его эксплуатации).

У электромобиля полный расход энергии достигает 0,044 кг н.э./км, из них 50% расходуется в топливном цикле, 19% - при изготовлении электромобиля и 31% при его эксплуатации. Изготовление электромобиля требует на 10-15% больше энергии, чем для ДВС. Суммарные выбросы парниковых газов достигают 153 г/км, в том числе 78% - на стадии WTP, 22% - при изготовлении электромобиля и 0% при его эксплуатации.

Для автомобиля с ТЭ на водороде полный расход энергии на 1 км составляет 0,062 кг н.э., из них 38% расходуется при эксплуатации автомобиля, 21% при его изготовлении и 41% на топливный цикл (WTP) (табл. 9в). Суммарные выбросы парниковых газов составляют около 175 г/км (81% выбросов происходят в цикле WTP, 19% при производстве водородного автомобиля и 0% при его эксплуатации).

Таким образом, переход на электромобиль приводит к существенной экономии энергии и выбросов загрязнителей в окружающую среду. При отсутствии специальных ограничений на выбросы парниковых газов традиционные автомобили с ДВС с учетом ожидаемого прогресса в снижении расходов топлива и повышении комфорта до конца 20-х годов сохраняют свое доминирующее положение в автопарке мира. Параллельно следует ожидать снижения затрат на альтернативные технологии. При этом скорее всего электромобиль и автомобиль с ТЭ на водороде будут развиваться и конкурировать друг с другом. Окончательно они найдут свои ниши в начале 30-х годов: электромобиль как массовый легковой транспорт расширит свое присутствие в условиях городской застройки, а автомобиль с ТЭ уйдет в область междугородного транспорта, в том числе автобусного и грузового.

Введение ограничений на выбросы углерода заставит форсировать переход к альтернативным технологиям. В значительной мере это коснется электроэнергетики, где безуглеродные технологии генерирования электроэнергии (возобновляемые источники энергии, ядерная энергия) значительно расширят свою долю. Особенно большие перспективы имеют

солнечная и ветровая энергетика в связи со значительным снижением стоимости электроэнергии, получаемой от этих технологий.

Отаковы общие тренды развития альтернативных технологий в автотранспорте. В отдельных странах и регионах изменение структуры автопарка будут происходить с различными темпами в зависимости от развития экономики, доходов населения, инвестиционного климата, национального законодательства и т.п. Это потребует более детального рассмотрения альтернативных технологий и топлив применительно к конкретным условиям отдельных стран и регионов.

Прогнозами развития новых технологий в автотранспорте занимаются все ведущие энергетические компании и организации. Считается, что электрическая мобильность в автотранспорте будет расти быстрыми темпами. В 2018 г. мировой рынок электромобилей превысил 5,1 млн., что на 2 млн. больше, чем в предыдущем году. При этом почти вдвое увеличился объем продаж новых электромобилей.

По прогнозам Международного энергетического агентства к 2030 г. в сценарии NewEnergyPolicy глобальные продажи электромобилей могут достичь 23 млн., а парк электромобилей превысит 130 млн. транспортных средств (без учета двух- и трех колесных систем). В сценарии EV30@30 (30% от транспортных средств) продажи электромобилей почти удвоятся и составят 43 млн., а мировой парк достигнет больше чем 250 млн. Прогнозируемые запасы EV в сценарии новой политики позволят снизить спрос на нефтепродукты на 127 млн. т н.э. (около 2,5 млн. барр. в сут. в 2030 году. В сценарии EV30 @ 30 снижение спроса на нефть оценивается в 4,3 млн. барр. в сут.. Прогнозируется, что спрос на электроэнергию для обслуживания электромобилей достигнет почти 640 ТВтч в 2030 г. в сценарии новой политики и 1 110 ТВтч в сценарии EV30 @ 30.⁶⁴

Примерно аналогичные оценки приводятся в прогнозах компаний Bloomberg (<https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>), ОПЕК (<http://www.opec.org>), Standard&Poors (<https://secure.viewer.zmags.com/publication/3a128229#/3a128229/2>), Goldman Sachs Group, BP, EnerData (<https://eneroutlook.enerdata.net>),⁶⁵

⁶⁴См. IE000A. *Global EV Outlook 2019/ Scaling up the transition to electric mobility*, 27 May 2019.

⁶⁵ Обзоры публикаций этих компаний приведены в работе Синяк Ю.В. Эффективность альтернативных топлив и технологий в развитии пассажирского автотранспорта в средне- и долгосрочной перспективе (электронный ресурс ИНИП РАН <https://ecfor.ru/publication/sinyak-yu-v-alternativnye-topliva-i-tehnologii-v-razvitiya-passazhirskogo-avtotransporta/>).