

# Прогнозы конкурентоспособности новых технологий в легковом автотранспорте (на примере Европейской части России)<sup>1</sup>

## Аннотация

*В статье рассмотрены вопросы конкурентоспособности альтернативных топлив и технологий в быстро растущем сегменте легкового автотранспорта. Появление новых технологий в легковом автотранспорте (электромобили, водородные авто с топливным элементом, биотоплива, природный газ и др.) заставляет по-новому взглянуть на перспективы развития этого сегмента. Предложена методика оценки экономической эффективности новых и традиционных технологий в автотранспорте с выделением трех основных компонентов: энергетические затраты, стоимость автомобиля и его компонентов, полные ущербы от загрязнения окружающей среды в трех основных циклах: топливный цикл, производство автомобиля и его использование. На основании такого тройственного подхода проведена оценка стоимости пробега основных конкурирующих технологий: 1) двигатель внутреннего сгорания на нефтетопливах, природном газе, синтетических углеводородах из природного газа, 2) электромобиль, 3) автомобиль с топливным элементом на водороде, получаемом из природного газа, угля, ядерной энергии, электролизом от энергосистемы или на базе децентрализованных источников энергии (солнечной и ветровой энергии). Выполнен анализ тенденций изменения основных характеристик новых технологий на легковом транспорте на ближайшие 15-20 лет. На основании полученных результатов на базе разработанной модели получены оценки стоимости пробега автомобилей с различными технологиями для текущего момента и на перспективу до 2040 г. Показано, что к 2030 г. электромобиль может стать наиболее эффективной массовой технологией для легкового автотранспорта, а к 2040 г. практически выйти на уровень водородного автомобиля с топливным элементом на базе водорода, получаемого из природного газа. В заключении статьи проведен анализ публикаций по перспективам развития сравниваемых основных альтернативных технологий в легковом автотранспорте.*

---

<sup>1</sup> Препринт (декабрь 2020 г.)

Comparison of the competitiveness of  
new technologies in passenger vehicles  
(on the example of the European part of Russia)

*The article discusses the competitiveness of alternative fuels and technologies in the rapidly growing segment of passenger vehicles. The emergence of new technologies in passenger vehicles (electric cars, hydrogen cars with fuel cell, biofuels, natural gas, etc.) makes us look at the prospects for the development of this segment in a new way. The methodology for assessing the cost-effectiveness of new and traditional technologies in motor vehicles with three main components is proposed: energy costs, the cost of the car and its components, the complete damage from pollution in the three main cycles: the fuel cycle, the production of the car and its use. On the basis of this triple approach, the cost of running major competing technologies was estimated: 1) the internal combustion engine on oil-derived fuels, natural gas, synthetic hydrocarbons from natural gas, 2) electric car, 3) a car with a fuel cell on hydrogen produced from natural gas, coal, nuclear energy, electrolysis from the power grid or on the basis of decentralized green energy sources (solar and wind energy). The analysis of trends in the main components of new technologies in passenger transport for the next 15-20 years has been analyzed. It is shown that by 2030 the electric car can become the most effective mass technology for passenger vehicles and by 2040 it will almost reach the level of a hydrogen car with a fuel cell based on hydrogen derived from natural gas.*

Транспорт является важнейшим элементом мировой экономической системы. В основе развития транспорта 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. Экономике, 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.

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 работы всех типов пассажирского транспорта.<sup>2</sup> Суммарное потребление конечной энергии в целом по миру составило 9,4 млрд. 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.).<sup>3</sup> Наиболее крупным потребителем энергии в транспортном секторе являются пассажирские перевозки, на долю которых приходится почти 2/3 энергопотребления в транспорте.<sup>4</sup> В пассажирских перевозках преобладают легковые автомобили, которые потребляют более 71% энергоресурсов в пассажирском сегменте (или 63% от суммарного потребления энергии в транспорте). В дорожном транспорте сегодня преобладают *двигатели внутреннего сгорания* (ДВС).

Между тем, непосредственный расход энергии в двигателях транспортных средств составляет только 66% от полного расхода энергии

---

<sup>2</sup> См. International Transport Forum, *ITF Transport Outlook 2017*.

<sup>3</sup> Рассчитано по *Key world energy statistics*, IEA, 2017.

<sup>4</sup> US EIA (Energy Information Administration), Information Transportation Energy Demand Departments (TEDO-2015) model estimates

дорожным транспортом. Дополнительные расходы связаны с содержанием и изготовлением самих 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.<sup>5</sup>

Что касается выбросов в атмосферу, то они составляют более 24% глобальных выбросов CO<sub>2</sub>.<sup>6</sup> Ожидается, что выбросы транспортными средствами будут расти более быстрыми темпами, чем в любом другом секторе. Это представляет собой серьезную проблему для достижения целей, установленных Парижским соглашением от 2015 г. Около 72% мировых выбросов транспортом приходится на автотранспорт, на который приходится 80% прироста выбросов с 1970 по 2010 г.

В свете рассмотренных соотношений в объемах работы различных видов транспорта и расходов энергии наибольший интерес вызывают проблемы *совершенствования технологий легкового автомобильного транспорта*. На сегодняшний день существует несколько принципиально различных вариантов технологий реализации легкового пассажирского транспорта, которые имеют возможности занять в течение ближайших десятилетий ведущее место в перевозках этого сегмента. Для выбора целесообразного пути совершенствования пассажирских перевозок дорожного типа необходим детальный анализ этих технологий с учетом *технологических, экономических, экологических и социальных факторов*, которые в конечном итоге определяют стоимость перевозки пассажиров или пробега в течение срока эксплуатации транспортных средств. Такой подход является элементом современной цифровизации экономики, обеспечивающим механизм выбора оптимальных направлений совершенствования технологий в течение обозримой перспективы первой половины XXI века.

***Метод оценки экономической эффективности инновационных технологий в транспорте.*** 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. Эту часть затрат можно отнести к социальным затратам.

---

<sup>5</sup> По данным J.-P. Rodrigue, C. Comtois and B. Slack, *The Geography of Transport Systems*, 4<sup>th</sup> Edition, Routledge, July 2009.

<sup>6</sup> <https://www.wri.org/blog/2019/10/everything-you-need-know-about-fastest-growing-source-global-emissions-transport>

Учет социальных затрат потребовал внесение ряда уточнений в процедуры, применяемые при обосновании новых технологий.

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 от добычи до заправочной станции, которые также участвуют в загрязнении окружающей среды на территориях, где расположены объекты топливного цикла; выбросы в сопряженных отраслях, обеспечивающих создание транспортного средства (производство компонентов и изготовление автомобиля).

В основе расчетов конкурентоспособности сравниваемых технологий положен анализ следующих данных: *стоимость энергоносителей, энергоэффективность, инвестиционные затраты, выбросы в окружающую среду, ущербы от загрязнения и их стоимостная оценка.*

***Стоимость энергоносителей.*** С целью придания расчетам большей достоверности было решено на начальном этапе сконцентрировать внимание на центральном регионе Европейской части России, как самым крупным потребителем энергии в транспортном секторе России. Поэтому в основу показателей были приняты укрупненные прогнозные данные по Москве и Московской области, для которых были оценены перспективные ожидаемых оценки цен на энергоносители в период до 2040 г. Эти данные приведены в табл. 1.

***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*

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

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2030	2035	2040
	<i>Расчетная оценка</i>						<i>Прогноз</i>		
Электроэнергия для промышленности (до 670 кВт, ценовая категория 1, напряжение СН-2, без НДС), руб./кВтч	4,79	4,96	5,13	5,31	5,50	5,69	6,65	7,60	7,93
<i>долл./кВтч</i>	0,074	0,076	0,079	0,082	0,084	0,087	0,102	0,117	0,122
То же с учетом НДС, руб./кВтч	5,75	5,95	6,16	6,38	6,60	6,83	7,98	9,12	9,52
<i>долл./кВтч</i>	0,088	0,091	0,095	0,098	0,101	0,105	0,122	0,140	0,146
Электроэнергия для населения (Москва и МО)									
Одноставочный тариф на электроэнергию, руб./кВтч	5,54	5,65	5,76	5,88	6,00	6,12	6,61	7,10	7,60
<i>долл./кВтч</i>	0,085	0,087	0,088	0,090	0,092	0,094	0,101	0,109	0,117
Тариф, дифференцированный по 2 зонам суток)									
- пиковая зона, руб./кВтч	6,36	6,49	6,62	6,75	6,89	7,03	7,59	8,15	8,72
<i>долл./кВтч</i>	0,098	0,100	0,102	0,104	0,106	0,108	0,117	0,125	0,134
- ночная зона, руб./кВтч	2,25	2,30	2,35	2,39	2,44	2,49	2,98	3,45	3,93
<i>долл./кВтч</i>	0,035	0,035	0,036	0,037	0,037	0,038	0,046	0,053	0,060
Уголь, т (5500-6000 ккал/кг), руб./т	3500	3600	3700	3800	3900	4000	4604	4988	5651
<i>долл./т</i>	53,73	55,26	56,80	58,33	59,87	61,40	70,68	76,57	86,74
Природный газ, руб./1000 м3	5561	5727	5899	6076	6259	6446	7256	8068	8881
<i>долл./1000 м3</i>	85,36	87,92	90,56	93,27	96,07	98,95	111,38	123,85	136,32
Бензин, Аи-95, руб./л	47,0	49,1	51,4	53,7	56,1	58,6	71,4	84,3	97,1
<i>долл./л</i>	0,72	0,75	0,79	0,82	0,86	0,90	1,10	1,29	1,49
Дизельное топливо, руб./л	44,4	46,4	48,5	50,7	53,0	55,4	68,3	80,6	93,0
<i>долл./л</i>	0,68	0,71	0,74	0,78	0,81	0,85	1,05	1,24	1,43

\* Пересчет в долл. выполнен по курсу 2019 г. (1 долл. = 65,1 руб.).

(например, долл. на 100 км пробега). При анализе основных технологий массового легкового автотранспорта рассматриваются три основные технологии: автомобиль с двигателем внутреннего сгорания (ДВС), электромобиль (ЭМ) 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.*

На основании публикаций по направлению технического прогресса в рамках трех основных технологий сделаны прогнозы влияния основных факторов, влияющих на параметры, определяющие экономичность технологий в перспективе до 2040 г.

***Проблемные вопросы автомобилей с ДВС.*** Важнейшим параметром автомобилей с ДВС 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%.<sup>7</sup> В обозримой перспективе существуют возможности дальнейшего снижения веса автомобиля еще на 28-30% к 2030.<sup>8</sup> Одновременно со снижением веса автомобиля наблюдается систематическое увеличение мощности двигателя, что в свою очередь ведет к росту расхода топлива. В среднем в настоящее время по автомобилям компакт-класса отношение мощности к весу автомобиля составляло около 0,102 кВт/кг,<sup>9</sup> с темпом роста 0,5-2,5% в год. Принимая, что дальнейший рост этого показателя может составить 1,3-1,5% в год, 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,

---

<sup>7</sup> Gillespie, Th. *Fundamentals of Vehicle Dynamic*, SAE International, 1999.

<sup>8</sup> MIT. *In the Road in 2035*, 2008; Lotus Engineering Inc. *An Assessment of Mass Reduction Opportunities*, 2010.

<sup>9</sup> Оценено по данным [www.automobile-catalog.com](http://www.automobile-catalog.com)

что мощность двигателя практически останется на стабильном уровне около 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 сокращен 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%.<sup>10</sup> К этим величинам следует добавить эффект от применения системы "стоп/старт", что позволяет почти на 60% снизить потери двигателя при работе в режиме холостого хода.<sup>11</sup>

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, жидкие топлива, получаемые из биотоплива, электроэнергия и водород.*

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. 4 приведены расчетные оценки возможного изменения стоимости новых автомобилей среднего класса с ДВС.

*Таблица 4. Прогноз усредненных параметров новых типовых автомобилей с ДВС среднего класса (вес 1200-1500 кг)\* (в ценах 2019 г.)*

	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>	<b>2035</b>	<b>2040</b>
Мощность, кВт	85	85	85	85	85	85
Расход топлива, л/100 км	6	5,6	5	4,8	4,2	3,9
Стоимость кузова, долл.	12000	12000	12000	12000	12000	12000
Удельная стоимость двигателя, долл./кВт	43	50	51	54	55	57
Итого ДВС, долл.	3655	4250	4335	4590	4675	4845
Прочее оборудование,	1180	1200	1300	1500	2500	3000

<sup>10</sup> *Influence on the Low Carbon Car Market from 2020-2030. Final Report. Element Energy, July 2011.*

<sup>11</sup> *The King Review of Low-Carbon Cars, King Review 2007.*



долл.*						
<b>Всего (округленно), тыс. долл. (долл.2019 г)</b>	<b>16 - 17</b>	<b>17,5</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
<b>Всего, млн. руб.</b>	<b>1,1</b>	<b>1,12</b>	<b>1,5</b>	<b>1,17</b>	<b>1,25</b>	<b>1,3</b>
<i>* Электроника, очистка выбросов и др. устройства</i>						

**Проблемные вопросы создания и применения электромобилей.** Здесь основные проблемы связаны с совершенствованием **электроаккумуляторов**. Создание дешевых и надежных накопителей электроэнергии в настоящее время связано с разработкой и совершенствованием литий-ионных аккумуляторов. Стоимость батарей этого типа, пригодных для использования в электромобилях, существенно снизилась за последние годы: только с 2010 по 2020 г. стоимость литий-ионных аккумуляторов упала с 1200 долл./кВтч до 135 долл.), т.е. практически на 90% за 10 лет. Ожидается, что стоимость аккумулятора может достигнуть к 2030 г. до 100 долл./кВтч. В ближайшие годы компания Tesla планирует построить крупный завод по производству аккумуляторов для электромобилей. Это позволит снизить стоимость аккумуляторов до 88 долл. и даже до 38 долл./кВтч.<sup>12</sup>

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.<sup>13</sup>

*Использование в электромобилях редких металлов*, в первую очередь таких, как литий, никель, кобальт, медь и др. для изготовления анода и катода, которые способствуют снижению потерь внутри аккумулятора или играют роль катализаторов. 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

<sup>12</sup> [http://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](http://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)

<sup>13</sup> <https://www.economist.com/graphic-detail/2017/08/14/the-growth-of-lithium-ion-battery-power>

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.<sup>14</sup> 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 емкостью 70 кВтч содержит 63 кг литиевого эквивалента (LCE), что соответствует примерно 12 кг лития на один электромобиль. В 2019 г. мировое производство лития составило 77 тыс. т (без учета США), из них в производстве литий-ионных аккумуляторов было использовано около 65%,<sup>15</sup> в том числе 14% приходилось на аккумуляторные батареи для электромобилей.<sup>16</sup> 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.).<sup>17</sup> 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 достаточны для того, чтобы полностью 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 третьим важным материалом в электроаккумуляторах. Рынок этого материала быстро растет. В каждом аноде батареи Tesla Model S (85kWh) содержится 54 кг графита. По оценкам Benchmark Mineral Intelli-

---

<sup>14</sup> Goldman Sachs Group. *Electric Vehicle Boom: ICE-ing The Combustion Engine*, September 6, 2017, p. 35.

<sup>15</sup> В 2018 г. добыча достигала 95 тыс.т (<http://basemine.ru/06/mirovloe-proizvodstvo-zapasy-i-ispolzovanie-litiya-2018-2019/>).

<sup>16</sup> EUROPEAN COMMISSION. *Report on Raw Materials for Battery Applications*. Brussels, 17.5.2018 SWD(2018) 245 final.

<sup>17</sup> Goldman Sachs Group. *Electric Vehicle Boom: ICE-ing The Combustion Engine*, September 6, 2017, p. 35.

gence,<sup>18</sup> 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.

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

Сдерживающим фактором при использовании автомобилей может стать время зарядки аккумулятора, которое определяется мощностью зарядного устройства. На сегодняшний день разработаны и предлагаются зарядные различные зарядные устройства мощностью от нескольких киловатт с подключением к стандартной домашней розетке устройства, что обеспечивает в течение одного час пробег автомобиля до 10-12 км, до 190-200 кВт и больше ("быстрая зарядка"), гарантирующих в течение получаса зарядки 80% емкости аккумулятора. Естественно, стоимость таких зарядных устройств достигает нескольких десятков тысяч долл.

Существуют предложения в случае разрядки аккумуляторов заменять их на новый, полностью заряженный. Однако, это возможно организовать только на специально приспособленных для такой замены автомобилях и требует инфраструктуры для быстрой смены аккумуляторов. Эту идею реализовала, например, компания General Motors в проекте Nu-Wire. Компания Треха (США) заявила о готовности запустить серийное производство платформ для замены аккумуляторов в различных типах автомобилей.<sup>19</sup> Но процесс требует не только технического решения, но и согласования с большим количеством компаний, уже выпускающих автомобили.

В России принято правительственное решение с установкой на всех АЗС специальных терминалов с напряжением 500 в и 125 а для подзарядки

---

<sup>18</sup> <https://www.benchmarkminerals.com/category/graphite/>

<sup>19</sup> <http://ecoconceptcars.ru/2010/12/trexa-ev.html>

аккумуляторов электромобилей. Однако этот проект практически заморожен поскольку при существующей в стране массовой застройке считается, что время зарядки при таких параметрах зарядных устройств является слишком большим, что будет сильно ограничивать применение электромобилей в стране.<sup>20</sup> Переход на более высокие параметры признаны небезопасными при массовом применении.

*Беспроводная зарядка аккумуляторов.* Технология основана на принципе индуктивной зарядки, которая предполагает передачу электроэнергии через воздушный зазор между несущим кабелем, проложенным в полотне дороги, и автомобилем. Это похоже на то, как работают зарядные устройства для беспроводных телефонов, но здесь масштаб магнитного потока должен быть значительно бóльшим. Между тем, существует ряд принципиальных недостатков беспроводной зарядки: потери энергии возрастают до 10-15%; создание инфраструктуры для беспроводной зарядки является дорогостоящим фактором, что приводит к ограничению использования беспроводной зарядки в густонаселенных городских районах; магнитные поля, возникающие при беспроводной зарядке, могут представлять угрозу для населения и другим электромагнитным устройствам, не относящимся к электромобилю.

В настоящее время существует ограниченное количество компаний, предлагающих беспроводную зарядку технологии. Так, компания Qualcomm Halo использует специальные системы беспроводной зарядки, которые уже применяются в машинах серии *Formula E*.<sup>21</sup> Они могут передавать до 22 кВт мощности при скоростях до 100 км/час, что соответствует уровню, достигнутому в существующих быстрых стационарных зарядных устройствах.<sup>22</sup> Еще одним крупным разработчиком беспроводных систем является Plugless, которая предлагает беспроводную систему зарядки для общественного пользования. Компания Nissan в настоящее время работает над «технологией будущего» для Nissan LEAF, которая также включает беспроводную зарядку. На автосалоне в Париже компания Mercedes Benz объявил, что уже с 2018 г. некоторые из ее моделей уже оснащаются беспроводной системой зарядки аккумуляторов.<sup>23</sup>

---

<sup>20</sup> <https://hi-tech.mail.ru/review/kak-ehlektromobili-zahvatyvayut-mir-i-pochemu-rossiya-soprotivlyaetsya/>

<sup>21</sup> <https://hi--news-ru.turbopages.org/hi-news.ru/s/technology/qualcomm-ispytala-texnologiyu-besprovodnoj-zaryadki-elektromobilej-halo-wevc.html>

<sup>22</sup> 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.

<sup>23</sup> [www.slashgear.com](http://www.slashgear.com)

В табл. 5 приведены прогнозные оценки стоимости электромобилей среднего класса с учетом основных технологических изменений в основных компонентах конструкции электромобилей.

Таблица 5. Прогноз усредненных параметров новых электромобилей среднего класса (мощностью 75-120 кВт)\* (в ценах 2019 г.)

	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
Удельная стоимость электроаккумулятора, долл./кВтч	300	250	200	150	100	75
Всего стоимость электроаккумулятора, долл.	18000	13500	11900	9600	6750	4875
Стоимость кузова, \$	12000	12000	12000	12000	12000	12000
Удельная стоимость электромоторов, долл./кВт	50	20	15	10	8	7
Всего стоимость электромоторов, долл.	4250	1700	1275	850	680	595
Прочее оборудование, долл.**	2360	2400	3000	3000	3000	3000
<b>Всего (округленно), тыс. долл.</b>	<b>35-37</b>	<b>30</b>	<b>28</b>	<b>25</b>	<b>22</b>	<b>20</b>

\* При массовом 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/

**Проблемные вопросы водородных автомобилей с ТЭ.** Экономика водородных автомобилей в значительной мере определяется следующими факторами: *стоимость водорода и связанная с ним инфраструктура производства, доставки и хранения энергоносителя, степень совершенств самого ТЭ как энергетической машины, хранение водорода на борту автомобиля.*

Существует широкий ряд различных ТЭ, принципиально различающихся составом электролита, требованиями к рабочему агенту, параметрами процесса и условиями применения. Наиболее перспективным типом ТЭ для автотранспорта являются ТЭ с протонообменной мембраной (РЕМ – proton-exchange fuel cell). Эти элементы работают при температурах 50-100°C, но требуют применения дорогостоящих платиновых катализаторов на аноде и катоде. Съем мощности у этих ТЭ достаточно высокий (3,8-13,5 кВт/м<sup>2</sup>). ТЭ типа РЕМ хорошо работают в переменных режимах нагрузки и имеют короткий срок выхода в рабочее состояние (1-3 сек.). В связи с низкими рабочими температурами ТЭ типа РЕМ требуется создание дополнительных внешних устройств для получения водорода (например, путем риформинга углеводородов из природного газа или другими способами получения водорода), что увеличивает стоимость технологии.

Ожидается, что *стоимость ТЭ* может быть доведена до 30-50 долл./кВт.<sup>24</sup> В значительной мере сокращение стоимости ТЭ может быть обеспечено за счет снижения расходов платины. Если на начальном этапе применения ТЭ расход платины составлял 20 г/кВт, то к 2005 г. он был снижен до 0,8 г/кВт, а 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 расход платины может быть уменьшен до 0,2 г/кВт, что позволит иметь стоимость ТЭ около 30 долл./кВт при сроке службы 5000 час. Это соответствует примерно 240 тыс. км пробега, что практически соответствует гарантийному сроку работы водородного автомобиля. Это сделает ТЭ вполне приемлемым вариантом для использования взамен традиционного ДВС. Одновременно удельная мощность ТЭ увеличилась с менее 100 Вт/л в 1990 г. до 2500 Вт/л и более настоящее время.<sup>25</sup>

*Получение водорода* является важнейшей частью технологии водородного автомобиля. Существует достаточно широкий список способов производства H<sub>2</sub> и доставки его на борт водородного автомобиля. По нашим

---

<sup>24</sup> [http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/10004\\_fuel\\_cell\\_cost.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/10004_fuel_cell_cost.pdf)

<sup>25</sup> USDRIVE. *Fuel Cell Technical Team Roadmap*, June 2013 (energy.gov/sites/.../fctt\_roadmap\_june2013.pdf)

расчетам, применительно к принятым исходным данным по ценам на энергоносители, стоимость водорода для использования в водородной автомобиле может составить (долл./кг):<sup>26,27</sup>

<b>Способы получения H<sub>2</sub></b>	<b>2020 .....</b>	<b>2040</b>
<i>При централизованном производстве H<sub>2</sub>:</i>		
- прямая конверсия метана (ПКМ)	2,3-2,5	1,4-1,6
- газификация угля	5,6-5,8	3,8-4,0
- электролиз от энергосистемы	6-7	8,2-8,5
- электролиз на базе солнечных и ветровых электростанций	9-10	7-8
<i>При децентрализованном производстве H<sub>2</sub>:</i>		
- электролиз от энергосистемы	14-17	9-12

Недавно прошло сообщение, что ученые Томского политехнического университета разработали технологию получения карбида вольфрама высокой чистоты. Этот материал сможет заменить дорогие платиновые катализаторы, которые используются при получении водорода. Для синтеза материала необходима температура, около 3000 °С. Исследователи смогли достичь такой температуры наиболее экономично, с помощью быстрых плазменных струй. Новая технология обещает сделать водород еще более дешевым.<sup>28</sup>

*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 500 км. Для автомобиля компакт-класса это соответствует расходу водорода 4-5 кг/100 км. В настоящее время стоимость емкости для хранения газообразного водорода на

<sup>26</sup> См. подробнее работу Ю.В. Синяка и В.Ю. Петрова *Прогнозирование оценки стоимости водорода в условиях его централизованного производства*. Проблемы прогнозирования. 2008. N 3. - С. 35-46, посвященной моделированию технологий получения H<sub>2</sub> для использования в транспортных средствах. В статье используются уточненные данные по стоимости получения H<sub>2</sub>, сделанные Ю.В. Синяком, с учетом изменений, произошедших после публикации работы.

<sup>27</sup> В августе 2020 г. Европейская Комиссия приняла "водородную стратегию для Европы" (*A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*, [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen\\_strategy.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf)), где без всякого обоснования принято, что к 2030 г. стоимость водорода на базе электролиза от возобновляемых источников энергии может быть снижена в 2 раза по сравнению с текущими оценками, что естественно делает водород более экономически эффективным по сравнению с получаемым из органических топлив. Однако эти выводы нуждаются в серьезной проверке.

<sup>28</sup> <https://plus-one.vedomosti.ru/blog/zelenaya-energiya-dlya-megapolisa>

борту автомобиля оценивается величиной 550-580 долл./кг H<sub>2</sub> (17-18 долл./кВтч).<sup>29</sup> В обозримой перспективе ожидается снижение стоимости хранения газообразного H<sub>2</sub> до 360 долл./кг H<sub>2</sub> (11-12 долл./кВтч)<sup>30</sup>. Дальнейшее снижение затрат может быть обеспечено за счет повышения давления. Стоимость водородной системы при 700 атм. может снизиться к 2030 г. до 150-250 долл./кг H<sub>2</sub> (5-8 долл./кВтч).<sup>31</sup>

*Доставка водорода* является неотъемлемой частью централизованных систем водородной экономики. Для транспорта газообразного водорода в сжатом виде используются грузовые автомобили с емкостями высокого давления или трубопроводная передача, для сжиженного водорода – грузовой автомобиль с криогенными танками. При принятых допущениях стоимость доставки водорода на расстояние 50 км от завода по производству H<sub>2</sub> до заправочной станции примерно будет составлять: для газообразного водорода – 0,13-0,17 долл./кг H<sub>2</sub> при автомобильных перевозках и 0,6-0,7 долл./кг H<sub>2</sub> при транспорте по трубопроводу, а для жидкого водорода – 0,20-0,25 долл./кг H<sub>2</sub>.

Таким образом, инфраструктурные затраты в сумме увеличивают стоимость водорода на борту автомобиля на 0,8 -1 долл./кг H<sub>2</sub> для газообразного водорода и примерно на 2,6-3 долл./кг H<sub>2</sub> 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 оценены параметры водородного автомобиля с ТЭ в период до 2040 г. (табл. 6). Эти оценки приняты в расчетах экономической эффективности пробега автомобиля с ТЭ.

*Таблица 6. Прогноз усредненных параметров новых водородных автомобилей с топливным элементом (мощностью 75-120 кВт)\*  
(в ценах 2019 г.)*

	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>	<b>2035</b>	<b>2040</b>
Мощность, кВт	85	85	85	85	85	85
Пробег на одной заправке, км	400	450	550	650	750	950

<sup>29</sup> При использовании сжиженного H<sub>2</sub> затраты на создание криогенных емкостей существенно возрастают, хотя это позволяет увеличить пробег автомобиля.

<sup>30</sup> US DOE. *An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities*. Quadrennial Technology Review, Sept. 2015

<sup>31</sup> Influence on the Low Carbon Car Market from 2020-2030. Final Report. Element Energy, July 2011



Удельный расход H <sub>2</sub> , кг/100 км	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1
Стоимость кузова, долл.	12000	12000	12000	12000	12000	12000
Удельная стоимость топливного элемента, долл./кВт	215	175	120	100	75	50
Всего стоимость топливного элемента, долл.	18275	14875	10200	8500	6375	4250
Удельная стоимость емкости для хранения H <sub>2</sub> , долл./кг H <sub>2</sub>	650	550	350	200	175	150
Емкость для H <sub>2</sub> , кг H <sub>2</sub>	4,4	4,95	6,05	7,15	8,25	9,5
Стоимость емкости для H <sub>2</sub> , долл.	2860	2722,5	2117,5	1430	1443,75	1425
Удельная стоимость электромоторов, долл./кВт	50	20	15	10	8	7
Всего стоимость электромоторов, долл.	4250	1700	1275	850	680	595
Прочее оборудование, долл.*	2360	2400	2600	3000	3000	3000
<b>Всего (округленно), тыс. долл.</b>	<b>40</b>	<b>34</b>	<b>28</b>	<b>26</b>	<b>24</b>	<b>21</b>

\* 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., ИНИ РАН, Москва, 2009; *Influence on the Low Carbon Car Market from 2020-2030. Final Report*. Element Energy, July 2011; USDRIVE. *Fuel Cell Technical Team Roadmap*, June 2013 ([enrgy.gov/sites/.../fctt\\_roadmap\\_june2013.pdf](http://enrgy.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 2035-2040 гг. до 20-25 тыс. долл. (2015 г.) (примерно в 2 раза) и станет вполне сопоставимым с электромобилем.

В 2020 г. была опубликована EU Hydrogen Strategy: согласно документу, к 2030 г. в Европе должны быть построены водородные газопроводы протяженностью 23 тыс. км. Стратегия отдает приоритет возобновляемому водороду, то есть газу, получаемому исключительно за счет чистых технологий на базе солнечной энергии и ветра. Однако на переходном этапе допускается производство водорода из ископаемого топлива (природный газ и уголь). Правительство ЕС поддержит строительство до 2024 года 6 ГВт мощностей

по производству возобновляемого водорода. Ожидается, что инвестиции в отрасль составят до 470 млрд. евро к 2050 году.<sup>32</sup>

**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.<sup>33</sup>

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. Решающее значение на здоровье людей оказывают загрязнение воздуха крупными частицами (обычно PM10), а также 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, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>), по опубликованным данным, имеют менее выраженный эффект, хотя считается, что ущерб от них значительно преуменьшен. Исследования этого вопроса далеко не закончены.

---

<sup>32</sup> <https://plus-one.vedomosti.ru/blog/zelenaya-energiya-dlya-megapolisa>

<sup>33</sup> Как показывают выводы этого исследования, фактор ущербов для здоровья людей и окружающей среды заслуживает самого пристального изучения и анализа при обосновании направлений инновационной политики в развитии транспортных систем.

Ряд зарубежных исследований по вопросам экономической оценки влияния загрязнения атмосферы показал, что наибольшая доля в возможном ущербе принадлежит составляющей, связанной с влиянием на здоровье людей. Эта компонента достигает 75-80% суммарного экологического ущерба от выбросов автотранспорта.<sup>34</sup> В приводимых ниже расчетах значения ущерба для здоровья людей приняты по данным, содержащим наиболее подробные оценки.<sup>35</sup> 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 упрощенный 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 Delucchi<sup>36</sup> 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 условно 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. 7 показаны оценки ущербов для здоровья людей, использованные нами для расчета стоимостной компоненты влияния выбросов автотранспорта на полную стоимость годовой работы (пробега). Условно

---

<sup>34</sup> Jensen, 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.

<sup>35</sup> McCubbin 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.

<sup>36</sup> 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.

принято, что *категория I* соответствует эксплуатации автомобиля в 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 7. Принятые в работе оценки ущерба для здоровья людей от воздействия основных загрязнителей автотранспортом, долл./кг выбросов\*

Виды загрязнителей	Категории ущерба по территориальным зонам:		
	I (1)	II (5-10)	III (50-100)
VOC	0,175	0,88-1,75	8,75-17,50
CO	0,08	0,09-0,18	0,88-1,75
NOx	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
SOx	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.),

Основные загрязнители: VOC – летучие органические соединения, CO – оксид углерода, NOx – окислы азота, PM10 и PM2.5 – твердые частицы размером 10 и 2.5 микрона, SOx – окислы серы.

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

Существенный вклад в стоимостную оценку величины ущерба дает учет воздействия выбросов CO<sub>2</sub> на изменение климата. Здесь, как и в оценках других загрязнителей, нет единого мнения.<sup>37</sup> По разным источникам, оценки ущерба от климатических изменений варьируются от 5 до почти 4000 долл./т CO<sub>2</sub>.<sup>38</sup> На основе анализа большого количества опубликованных материалов

<sup>37</sup> 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](http://www.vtpi.org/ghg_valuation.pdf).

<sup>38</sup> M. Maibach, C. Schreyer, D. Sutter, H.P. van Essen, B.H. Boon, R. Smokers, A. Schrotten, C. Doll, B. Pawlowska, M. Bak. *Handbook on Estimation of External Costs in the Transport Sector*, Delft, February 2008.

рекомендуется использовать три варианта оценки ущербов от выбросов CO<sub>2</sub>: минимальную, среднюю и максимальную оценку (табл. 8).<sup>39</sup> Эти диапазоны приняты нами при расчете ущербов от изменения климата в связи с увеличением выбросов в атмосферу парниковых газов.<sup>40</sup>

Таблица 8. Диапазон и тенденции роста оценок для расчета возможного ущерба от выбросов CO<sub>2</sub>\*

	Долл./т CO <sub>2</sub> **		
	<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.-CO<sub>2</sub> произведен с учетом коэффициента *Global Warming Potential*, который равен 1 для CO<sub>2</sub>, 21 – для CH<sub>4</sub>, 310 – для N<sub>2</sub>O, 23900 – для SH<sub>6</sub> (M. Maibach, C. Schreyer, D. Sutter, H.P. van Essen, B.H. Boon, R. Smokers, A. Schrotten, 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 *Consumer Price Index*.

**Оценка расходов энергии и выбросов в окружающую среду по сравнимым технологиям автотранспорта.** Для расчетов была использована модель GREET (*The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation Model*).<sup>41</sup> Модель GREET выделяет три стадии потоков энергии и связанных с ними выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при анализе транспорт-ных систем: *топливный цикл (Well-to-Pump)* – от скважины до бака автомобиля, *эксплуатационный цикл* – непосредственная работа транспортного средства, *цикл изготовления*

<sup>39</sup> Далее в статье для экономии объема текста на графиках показаны только два крайних варианта результатов расчета при *минимальной (1)* и *максимальных* оценках (3).

<sup>40</sup> По некоторым работам, принятые нами оценки ущерба от выбросов парниковых газов являются сильно заниженными. Так, Ackerman F., Stanton E. *Climate Risks and Carbon Prices: Revising the Social Cost of Carbon, Economics: Open-Access*, Open-Assessment E-Journal, vol.6, 2012-10, April 2012 (<http://dx.doi.org/10.5018/economics-journal.ja.2012-10>) на основе углубленного анализа различных моделей, применяемых для оценки стоимости ущерба, отмечают, что диапазон оценок для 2050 г. с высокой долей вероятности может составлять 150 – 500 долл./т CO<sub>2</sub> (при максимальной оценке около 1500 долл./т CO<sub>2</sub>). Естественно, этот фактор может сильно влиять на эффективность технологий с различными выбросами CO<sub>2</sub>.

<sup>41</sup> Argonne National Laboratory, Energy Systems. *GREET® Model - The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation Model*, <https://greet.es.anl.gov/> (модель находится в открытом доступе).

автомобиля. На базе модели получены интегральные показатели расходов энергии и выбросов по трем видам транспортных технологий, включающие полные расходы энергии в топливном цикле, при производстве автомобиля, его эксплуатации и выбросов по сравниваемым технологиям (табл. 9).

Таблица 9. Интегральные показатели расходов энергии и выбросов различными типами легкового автотранспорта

	<i>ДВС</i>	<i>Электро-</i> <i>мобиль</i>	<i>Авто с ТЭ</i> <i>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
<b>Выбросы в атмосферу (г/км)</b>			
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
CO2-экв. (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

Как следует из табл. 9, для автомобиля с ДВС полный расход энергии на 1 км пробега достигает 0,076 кг н.э./км. При этом доля топливного цикла составляет всего 25%, около 10% приходится на изготовление автомобиля, а остальные 65% расходуются при эксплуатации автомобиля. При этом суммарные выбросы парниковых газов достигают около 266 г/км (в т.ч.

топливный цикл – 15%, 8% - при изготовлении автомобиля и 77% при его эксплуатации).

У электромобиля полный расход энергии равен 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 топливного цикла, 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% в топливном цикле. Суммарные выбросы парниковых газов составляют около 175г/км (81% выбросов происходят в цикле, 19% при производстве водородного автомобиля и 0% при его эксплуатации).<sup>42</sup>

#### ***Оценка эффективности сравниваемых транспортных средств.***

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. При этом стоимость пробега будет сильно зависеть от величины годового пробега. 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 снижению стоимости пробега.

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

---

<sup>42</sup> Детальные расчеты расходов энергии и выбросов по стадиям изготовления и эксплуатации сравниваемых транспортных средств более подробно приведены в статье Синяк Ю.В. "Проблемы конкурентоспособности новых технологий в легковом автотранспорте (ДВС – Электромобиль - Водородный автомобиль с топливным элементом)" (электронный ресурс на сайте ИПП РАН <https://ecfor.ru/publication/sravnenie-konkurentosposobnosti-novyh-tehnologij-v-legkovom-avtotransporte/>).

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 принято, что производство энергоресурсов и автомобилей происходит преимущественно в районах за пределами крупных населенных пунктов с меньшей плотностью населения, чем в городской среде, где происходит основная эксплуатация легкового автотранспорта.

Для водородной технологии характерны те же тенденции, что и для электромобиля. На фоне прогнозируемого сокращения стоимости новых водородных автомобилей 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 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.

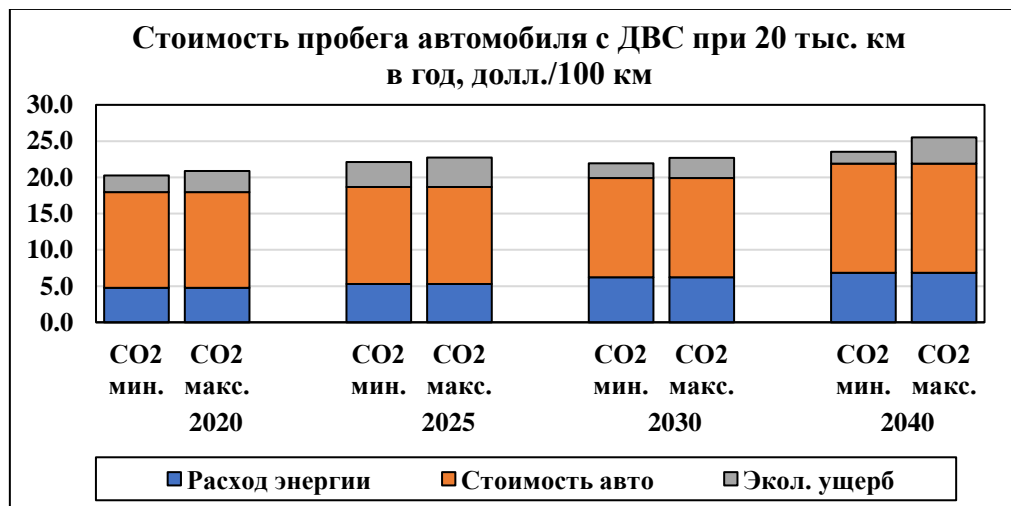
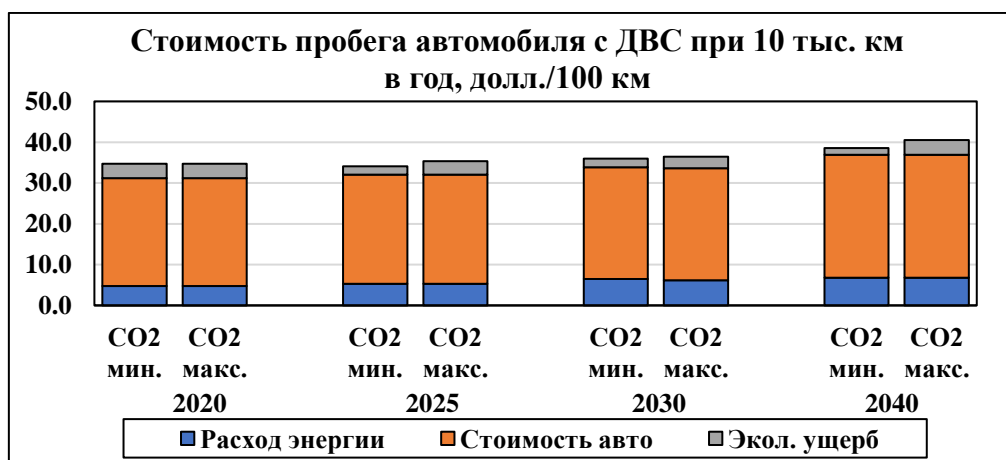
Ниже представлены результаты расчетов по трем технологиям автотранспорта (ДВС, электромобиль и водородный автомобиль с ТЭ) для принятых исходных данных, изложенных выше в статье.

*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. 1 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 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.

*Электромобиль.* В течение рассматриваемого периода затраты электромобиля заметно сокращаются (рис.2-3). 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%.



*Рис. 1.* Прогноз изменения стоимости пробега автомобилей с ДВС при минимальных и максимальных оценках ущерба от выбросов CO<sub>2</sub> и годовом пробеге от 10 до 20 тыс. км

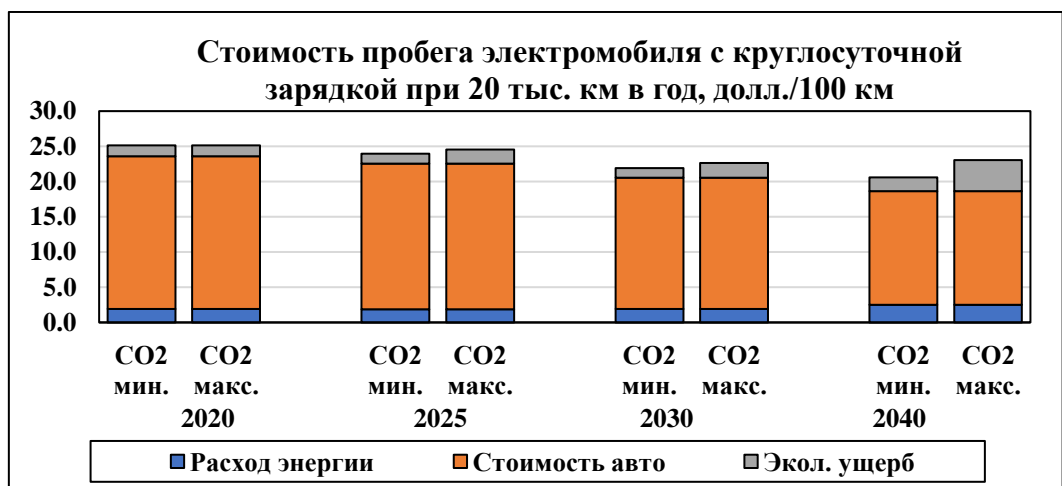
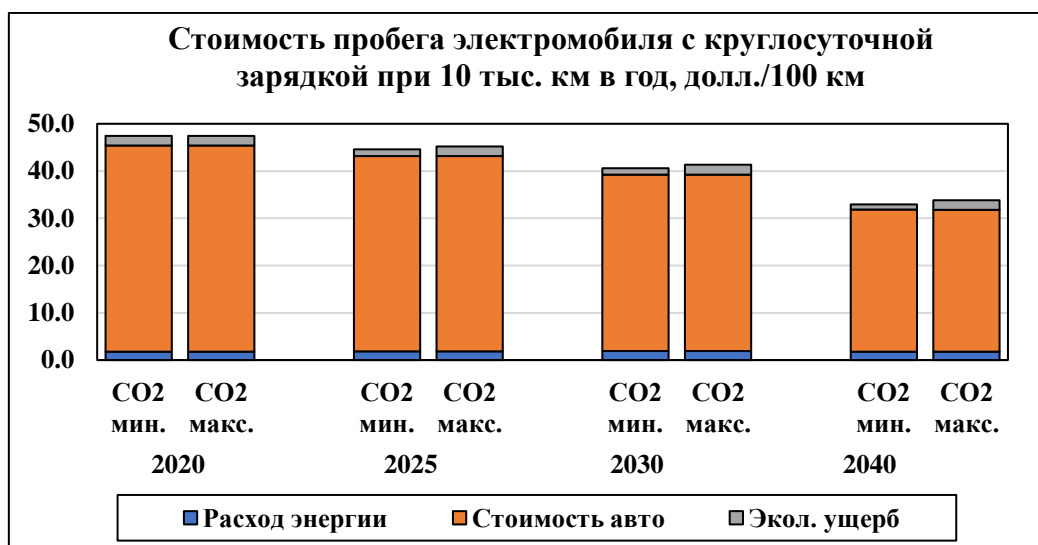


Рис. 2. Прогноз изменения стоимости пробега электромобилей при круглосуточной зарядке аккумуляторов, минимальных и максимальных оценках ущербов от выбросов CO<sub>2</sub> и годовом пробеге от 10 до 20 тыс. км

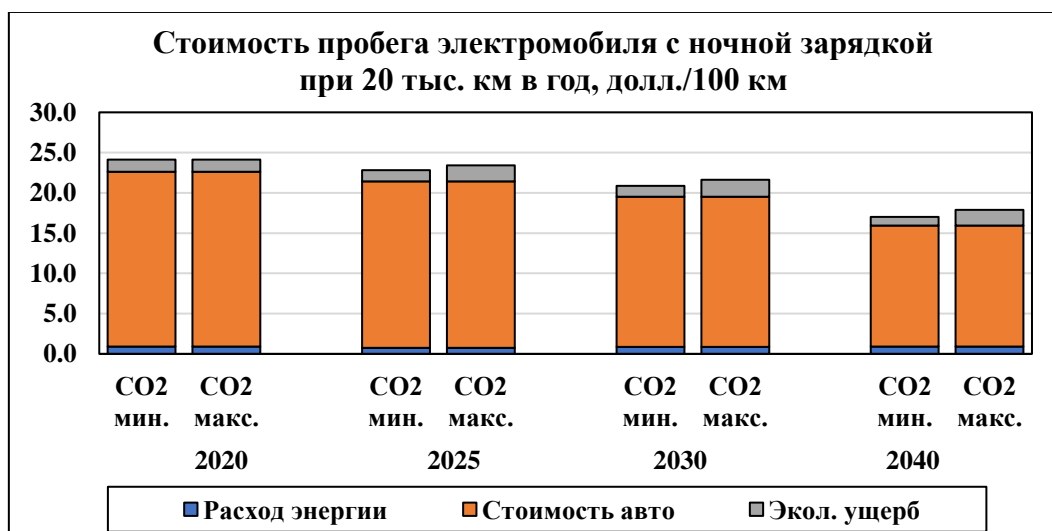
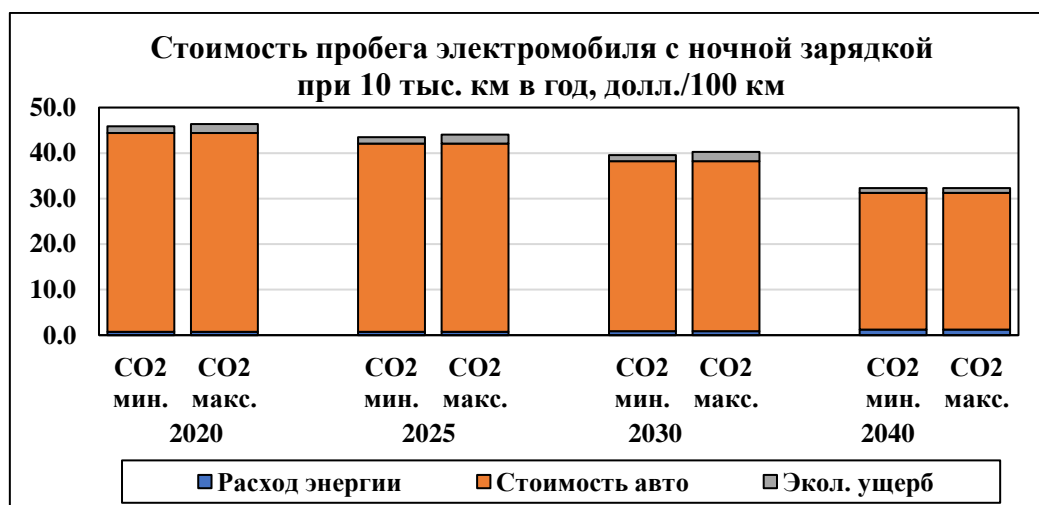
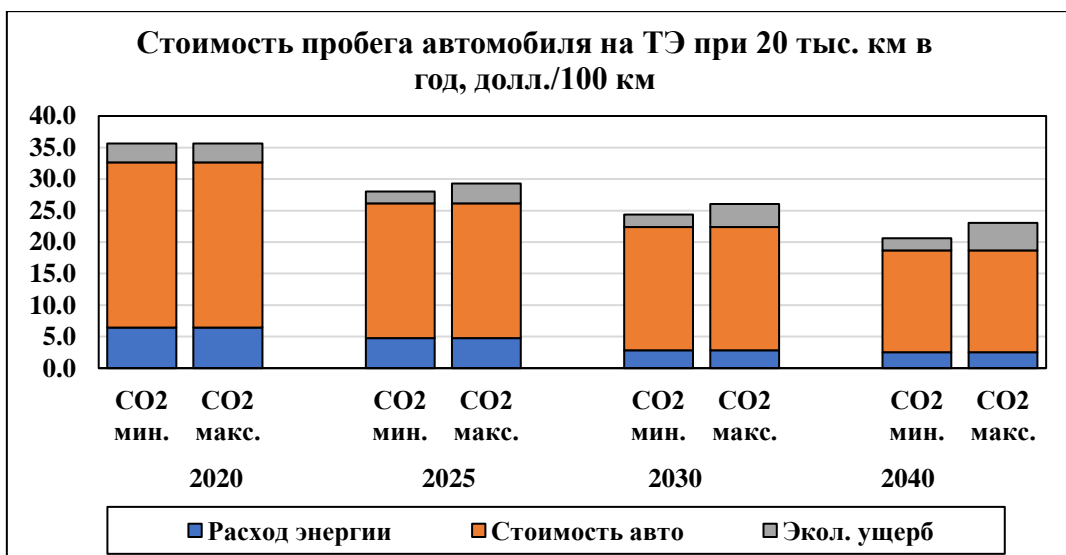
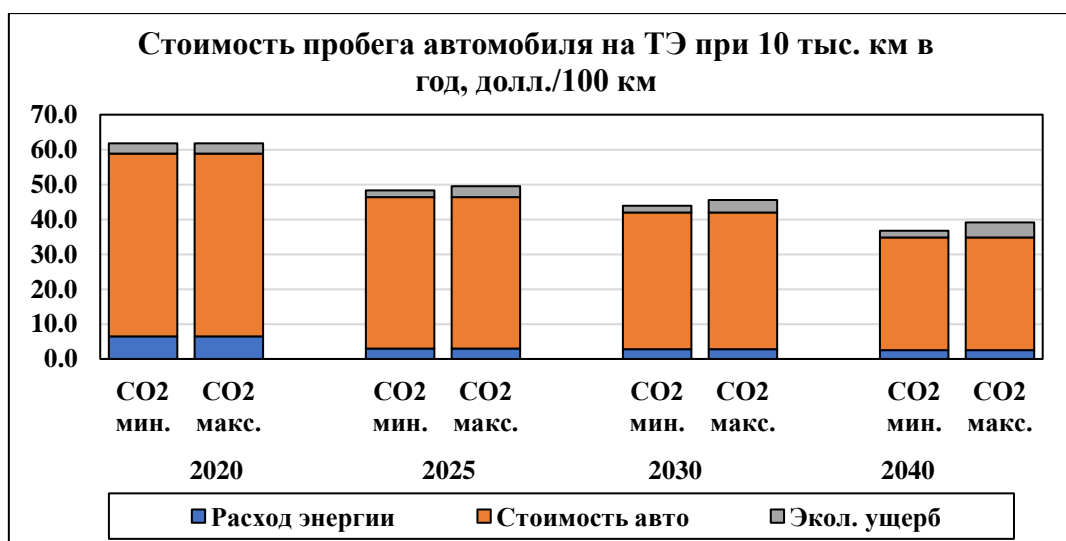


Рис. 3. Прогноз изменения стоимости пробега электромобилей при ночной зарядке аккумуляторов, минимальных и максимальных оценках ущербов от выбросов CO<sub>2</sub> и годовом пробеге от 10 до 20 тыс. км

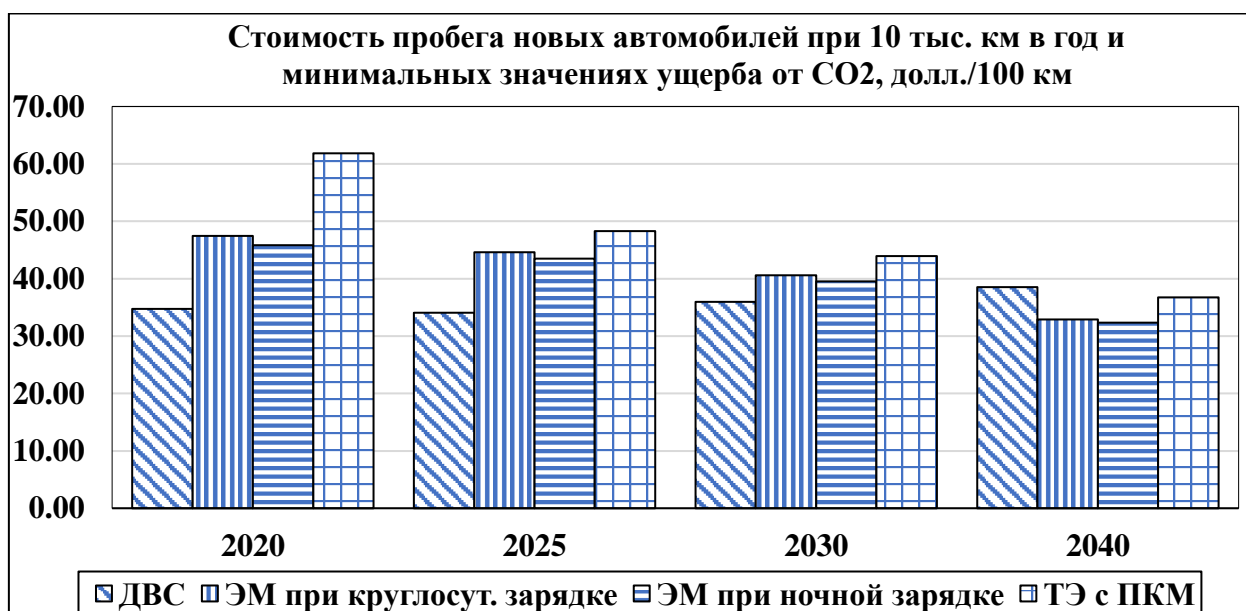


*Рис. 4.* Прогноз изменения стоимости пробега водородного автомобиля при минимальных и максимальных оценках ущерба от выбросов CO<sub>2</sub> и годовом пробеге от 10 до 20 тыс. км

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.

*Водородный автомобиль с топливным элементом* (рис. 4). 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 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.

На рис. 5 приведены значения полных затрат пробега сравниваемых технологий при минимальных значениях ущербов для здоровья людей и окружающей среды и годовом пробеге 10 тыс. Аналогичные данные приведены на рис. 6 для пробега 20 тыс. км в год.



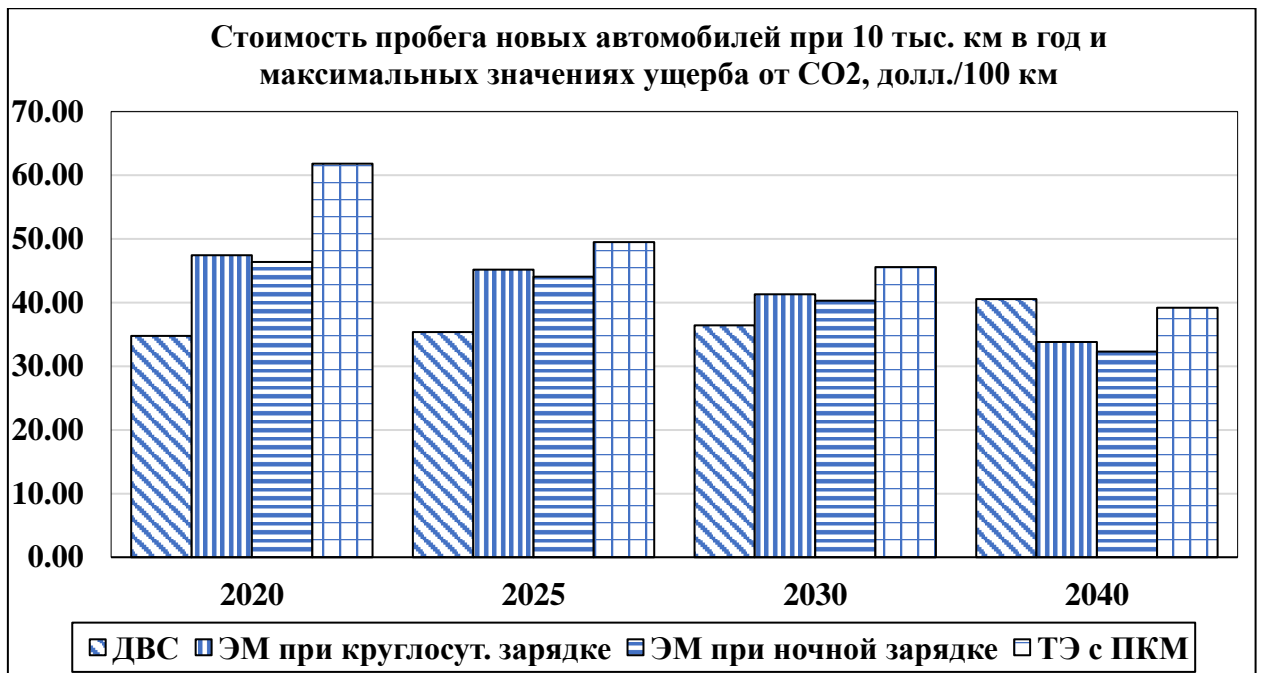
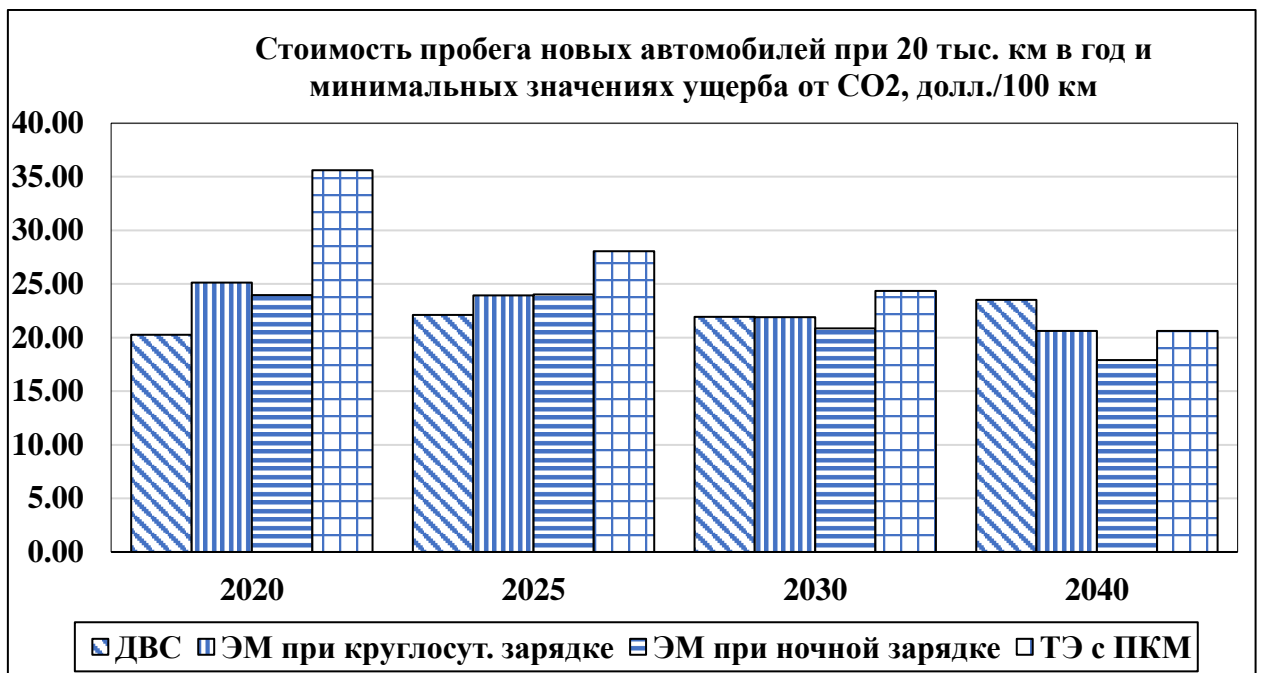
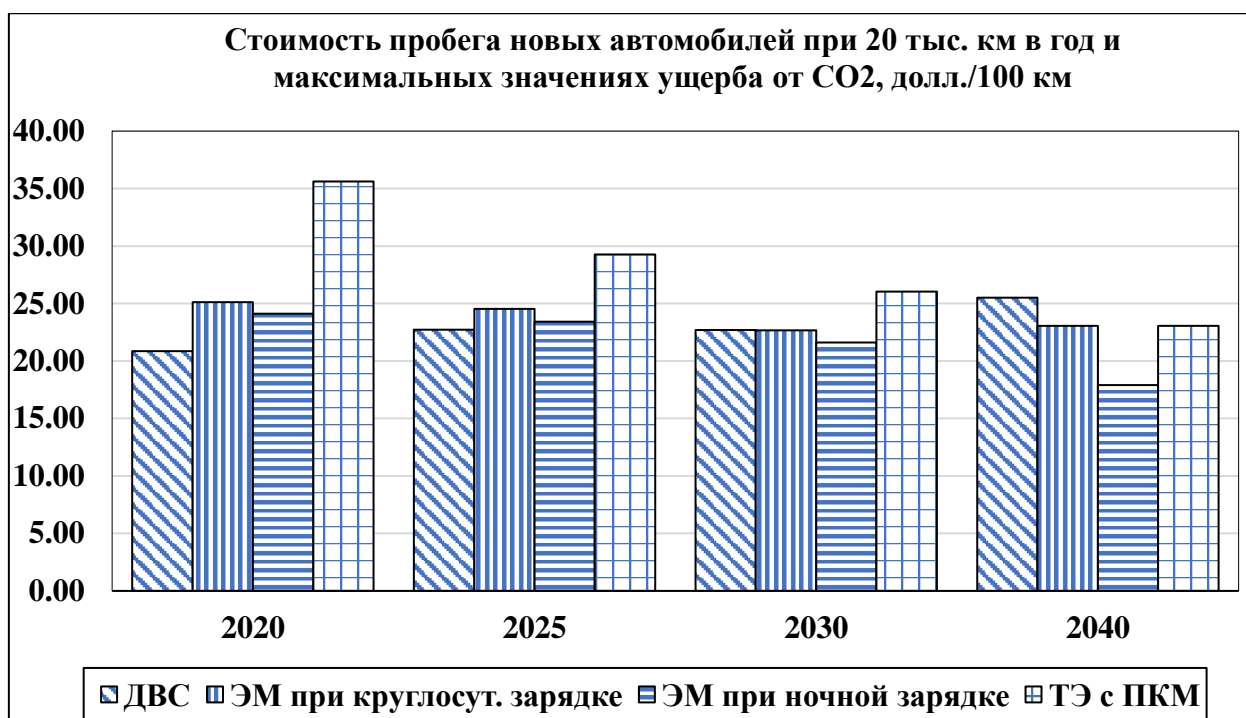


Рис. 5. Сравнительная оценка экономичности технологий автотранспорта при минимальных и максимальных оценках ущерба от выбросов CO<sub>2</sub> и годовом пробеге 10 тыс. км





*Рис. 6.* Сравнительная оценка экономичности технологий автотранспорта при минимальных и максимальных оценках ущерба от выбросов CO<sub>2</sub> и годовом пробеге 20 тыс. км

**Выводы.** 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. Как следует из результатов наших расчетов (рис. 1-6), скорее всего можно ожидать, что к 2040 г. стоимость пробега обоих типов автомобилей могут практически сравняться при увеличении длительности годового пробега свыше 20 тыс. км.

Окончательно они найдут свои ниши в начале 30-40х 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)



несомненно расширят свою долю в связи с ожидаемыми снижениями стоимости новых технологий.

Таким образом, выход на рынок альтернативных технологий и топлив в легковом автотранспорте приведет к сокращению спроса на моторные топлива из природной нефти (по оценкам Bloomberg, снижение спроса на нефть до 30-40%). При этом при минимальных оценках роста цен на нефть этого скорее всего можно ожидать в массовом порядке после 2030 г., а при максимальных ценах замена автопарка с ДВС начнется уже после 2025 года.

Преобладающими альтернативными технологиями после 2040 г. могут стать электромобиль и, возможно, автомобиль с ТЭ на водороде, получаемом на первом этапе из природного газа методом прямой конверсии метана, в дальнейшем по мере увеличения ущербов от загрязнения окружающей среды и совершенствования технологий не исключено, что в качестве источника водорода к 2050 г. могут получить методы его производства на базе возобновляемых источников энергии.

**Прогнозы распространения электромобилей в глобальном масштабе.** В последние годы в большинстве прогнозов развития мировой энергетики особое место уделяется проблемам внедрения электромобилей. По прогнозам *International Energy Agency* (IEA)<sup>43</sup> к 2030 г. в сценарии *New Energy Policy* (базируется на оценках отдельных стран) глобальные продажи электромобилей могут достичь 23 млн. в год, а парк электромобилей превысит 130 млн. транспортных средств (без учета двух- и трех колесных систем). В сценарии *EV30@30* (при условии достижения доли электромобилей в размере 30% от транспортных средств к 2030 г.) продажи электромобилей должны почти удвоиться и составить 43 млн./год, а мировой парк достигнет больше чем 250 млн. Прогнозируемые темпы развития электромобилей позволят снизить спрос на нефтепродукты на 127 млн. т н.э. (около 2,5 млн. барр. в сут. в 2030 г.). В сценарии *EV30@30* снижение спроса на нефть в результате сокращения доли автомобилей с ДВС оценивается в 215 млн. т н.э. (4,3 млн. барр./сут.). Прогнозируется, что дополнительный спрос на электроэнергию только для обслуживания электромобилей составит к этому времени от 640 до 1100 ТВтч/год.

По прогнозам компании *Bloomberg*,<sup>44</sup> в 2040 г. более 50% продаж новых автомобилей и 33% мирового автопарка будут электрическими. Падение цен на батареи приведет к росту конкурентоспособности

---

<sup>43</sup> IEA. *Global EV Outlook 2019/ Scaling up the transition to electric mobility*, 27 May 2019.

<sup>44</sup> Bloomberg New Energy Finance's 2017 Long Term Electric Vehicle Outlook. <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>

электромобилей во всех основных сегментах легкового автотранспорта (даже без субсидирования их цены) до 2030 г., что будет способствовать повышению темпов спроса на автомобили с электроприводом. Ожидается, что точка перелома в развитии электромобилей будет находиться между 2025 и 2030 гг.

Наибольший объем продаж электромобилей будет приходиться на Китай (около 15 млн. в 2040 г.) и США (около 10 млн.). В Европе годовые продажи электромобилей к 2040 г. не превысят 4-5 млн. Зато продажи в остальных странах мира будут опережать китайский рынок и составят около 17-18 млн. По типу электромобилей максимальный объем продаж к 2040 г. составят электромобили компакт-класса - более 20 млн. Около 15 млн. обеспечат малые электромобили. и более 10 млн. спортивные авто с электрическим приводом. Интересно отметить, что к 2040 г. ожидается производство "умных" электромобилей (автономного вождения, для carsharing и др.). Их число не превысит 5 млн. шт.

Менее оптимистичными выглядят прогнозы *ОПЕК*.<sup>45</sup> Доля электромобилей в общем мировой продаже легковых автомобилей прогнозируется на уровне около 37% к 2040 г. (в том числе 30% будет приходиться на "чистые" (батарейные) электромобили и 7 % на гибриды). При этом в развитых странах доля электромобилей в продажах может достигнуть 52%, из них 43% - "чистые" электромобили и 9% гибриды. В совокупности доля электромобилей в общем мировом парке автомобилей парке автомобилей (легковые и коммерческие автомобили) прогнозируется на уровне около 13%, а с учетом альтернативных топлив доля новых транспортных средств может возрасти к 2040 году до 18%. Во всех сценариях ОПЕК предполагается, что доля новых транспортных средств на альтернативных топливах и технологиях (природный газ, водород и др.) будет оставаться достаточно скромной, особенно в странах ОЭСР и в странах Азии.

В прогнозах *Goldman Sachs Group*<sup>46</sup> интенсивное развитие электромобилей ожидается только после 2025 г., когда стоимость электроаккумуляторов (наиболее дорогой элемент в электромобиле) снизится до уровня, при котором гарантируется срок окупаемости электромобиля по сравнению с традиционным автомобилем с ДВС не более 3 лет. Компания ожидает, что доля электромобилей в продажах новых автомобилей может

---

<sup>45</sup> Organization of the Petroleum Exporting Countries. *2018 OPEC World Oil Outlook*. October 2017. <http://www.opec.org>.

<sup>46</sup> The Goldman Sachs Group Inc., *Electric Vehicle Boom: ICE-ing The Combustion Engine*. EQUITY RESEARCH, September 6, 2017.

достичь к 2040 г. 32% (45 млн.), хотя при благоприятных условиях эта величина может подняться до 70 млн. Наибольший объем продаж будет наблюдаться в Китае, где к 2040 г. они могут достичь 14-21 млн. шт. (40-57%) (в зависимости от сценария). Далее в порядке убывания рынок новых электромобилей в 2040 г. может составить: в Западной Европе (50-67%) и США (45-57%) - около 7,5-10 млн. шт., в Индии – 6-8 (38-50%) млн. шт., в Японии – 2-3 млн. шт. (35-55%).

В исследованиях *British Petroleum* (BP)<sup>47</sup> предполагается, что рост благосостояния в развивающихся странах приведет к увеличению спроса на топливо на транспорте, несмотря на одновременное значительное повышение эффективности его использования. В эволюционном сценарии количество легковых автомобилей на планете к 2040 г. составит 2 млрд. авто, включая более 300 миллионов электромобилей.

Интересное исследование по электромобилям выполнила компания *EnerData*.<sup>48</sup> Основываясь на последнем обновлении своих долгосрочных прогнозов в январе 2018 г., доля электромобилей в общем глобальном автопарке может достичь 44% в 2040 г. и более 50% к 2050 г. Эти уровни соответствуют наиболее экологически ориентированному сценарию с сильной декарбонизацией, что обеспечивает роста глобальной температуры не более +2°C. При умеренной декарбонизации (рост температуры до +4°C) эти доли достигают 24% в 2040 г. и 33% в 2050 г.

Таким образом, подводя итоги проведенного анализа можно сделать вывод, что альтернативные технологии в автомобильном легковом транспорте безусловно могут представлять интерес для развития топливно-энергетического сектора в Европейской части России после 2030 г. с точки зрения обоснования стратегий и подходов к решению задач мобильности товаров и перемещения людей, обоснования технологий с учетом экономических и энергетических затрат, снижения выбросов в окружающую среду и углерода при решении задач изменения климата.

---

<sup>47</sup> BP plc, 2018 *BP Energy Outlook*, 2018.

<sup>48</sup> EnerData (2018), *EnerFuture World Energy Scenarios to 2040*, 14 March 2018, <https://eneroutlook.enerdata.net>.