

Эффективность альтернативных топлив и технологий в развитии пассажирского автотранспорта в средне- и долгосрочной перспективе¹

Синяк Ю.В. (ИНП РАН)

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы конкурентоспособности альтернативных топлив и технологий в быстро растущем сегменте легкового автотранспорта, который в глобальном масштабе потребляет более 70% топлива, расходуемого на пассажирские перевозки и около 45% в целом по транспорту. Показано, что миграция населения имеет большое влияние на развитие рынка персональных автомобилей. Появление новых технологий в персональном 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 технологий в автотранспорте с выделением трех основных компонентов: энергетические затраты, стоимость автомобиля, ущербы от загрязнения окружающей среды. На основании такого 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 период ближайших 15-20 лет. На основании полученных выводов на базе разработанной модели получены оценки стоимости пробега автомобилей с различными технологиями для текущего момента и на перспективу. Показано, что к 2025-2035 гг. электромобиль может стать наиболее эффективной массовой технологией для персонального автотранспорта. В заключении статьи проведен анализ публикаций по перспективам развития электромобилей.

Annotation

The article discusses issues of competitiveness of alternative fuels and technologies in the rapidly growing segment of passenger cars, which globally consumes more than 70% of the fuel used by the whole passenger transportation and about 45% by the

¹Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-02-00397-ОГН\18).

transport as a whole. It is shown that the growing population migration has a great influence on the development of the personal car market. The emergence of new technologies in personal vehicles (electric cars, hydrogen cars with a fuel cell, biofuels, natural gas, etc.) makes it necessary to take a fresh look at the prospects for the development of this segment. A method for assessing the economic efficiency of new technologies in motor vehicles has been proposed, highlighting three main components: energy costs, the cost of a car, and the damage caused by environmental pollution. Based on this approach, the estimated cost of mileage of the main competing technologies was assessed: 1) for an internal combustion engine using oil products, natural gas, synthetic hydrocarbons from natural gas, etc., 2) for an electric vehicle, 3) for a car with a hydrogen fuel cell derived from natural gas, coal, nuclear energy, electrolysis from the power system or on the basis of decentralized energy sources (solar and wind energy). The analysis of trends in the main characteristics of new technologies for the next 15–20 years has been analyzed. On the basis of the developed model, estimates of the cost of mileage of cars with different technologies for the current moment and for the future are obtained. It is shown that by 2025-2035. electric car can be the most effective mass technology for personal vehicles. In conclusion, the article contains an analysis of most respectful publications on the prospects for the development of electric vehicles.

Оглавление

| | |
|--|-----|
| 1. Роль транспорта в мировой экономической системе | 5 |
| 2. Альтернативные виды топлив и технологий в автотранспорте..... | 18 |
| 2.1. Природный газ | 19 |
| 2.2. Синтетические жидкие топлива | 21 |
| 2.3. Биотопливо..... | 24 |
| 2.4. Электричество | 27 |
| 2.5. Водород..... | 27 |
| 3. Основные показатели для расчета эффективности различных технологий легкового автотранспорта | 28 |
| 3.1. Метод оценки экономической эффективности инновационных технологий | 28 |
| 3.2. Оценка энергозатрат и выбросов автотранспорта в окружающую среду (по модели GREET) | 35 |
| 3.3. Оценка перспективных цен на энергоносители и других факторов, учитываемых в расчетах конкурентоспособности | 40 |
| 3.4. Оценка ущербов для здоровья людей и окружающей среды от загрязнения атмосферы выбросами автотранспорта | 43 |
| 3.5. Дополнительные параметры, учитываемые при сопоставлении альтернативных технологий ... | 46 |
| 4. Перспективы совершенствования легковых автомобилей с различными типами двигателя | 47 |
| 4.1. Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) | 47 |
| 4.1.1. Пути совершенствования ДВС | 47 |
| 4.1.2. Ожидаемое сокращение выбросов и ущербов от загрязнения окружающей среды для автомобилей с ДВС..... | 52 |
| 4.1.3. Расчет стоимости эксплуатации автомобилей с ДВС | 55 |
| 4.2. Электромобиль | 59 |
| 4.2.1. Пути совершенствования электромобиля..... | 59 |
| 4.2.2. Ожидаемое сокращение выбросов и ущербов от загрязнения окружающей среды от электромобиля..... | 68 |
| 4.2.3. Расчет стоимости эксплуатации электромобиля | 72 |
| 4.3. Водородный автомобиль с ТЭ | 73 |
| 4.3.1. Совершенствование водородного автомобиля с ТЭ | 73 |
| 4.3.2. Экономика технологий получения водорода | 81 |
| 4.3.4. Ожидаемые сокращения выбросов и ущербов от загрязнения окружающей среды для водородного автомобиля с ТЭ..... | 100 |
| 4.3.5. Расчет стоимости эксплуатации водородного автомобиля с ТЭ | 102 |
| 5. Сопоставление экономичности использования традиционных и альтернативных топлив и технологий в легковом автотранспорте | 109 |
| 6. Перспективы массового использования альтернативных топлив и технологий в автотранспорте (по материалам крупных зарубежных компаний и организаций) | 113 |

| | |
|--|-----|
| 6.1. Глобальные прогнозы ITF по развитию основных видов транспорта | 113 |
| 6.2. Перспективы роста парка электромобилей и их влияние на нефтяной рынок и спрос на электроэнергию | 120 |
| 6.2.1. Текущее состояние продаж электромобилей в мире | 121 |
| 6.2.2. Прогнозы развития электромобилей по оценкам крупных компаний и организаций | 122 |
| Использованная литература | 135 |

1. Роль транспорта в мировой экономической системе

Транспорт является важнейшим элементом мировой экономической системы. В основе развития транспорт лежит принцип мобильности - людей, товаров, информации, идей. Мобильность - одна из самых фундаментальных и важных характеристик экономической или социальной деятельности, 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.

В развитых странах на транспорт приходится более десяти процентов экономической активности.² Эта 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 ВВП. Доходы глобальной транспортной отрасли достигли 1,6 трлн. долл. в 2015 году.³ Эти данные свидетельствуют о том, что валовой внутренний продукт (ВВП) является крупнейшим детерминантом поступлений от транспортных доходов, в то время как тенденции роста выручки зависят от множества факторов, включая экономический рост, колебания валютных курсов и международной торговой деятельности. В транспортной отрасли задействовано около 10 млн. чел. и составляет около 5% валового внутреннего продукта (ВВП).

Современные транспортные системы имеют основополагающее значение для способности бизнес-компаний конкурировать на мировых рынках. Затраты на логистику, такую как транспорт и хранение, приходится 10-15% от стоимости готовой продукции для европейских компаний. Качество транспортных услуг оказывает большое влияние на качество жизни людей. В среднем 13,2% бюджета каждого домохозяйства тратится на транспортные товары и услуги. Транспортные услуги являются фундаментальным аспектом развитой

²Kauppil J. Ten stylized facts about household spending on transport. Statistical Paper 2010-3, September 2010, ITF Paris.,

³Total general government expenditure on economic affairs, 2016 (%GDP % of total expenditure).png (<http://ec.europa.eu/statistics-explained/index.php?title=File>).

экономики, поэтому производительность и транспортная активность, как правило, растут с развитием экономики.

По содержанию транспортная активность, связанная с перемещением людей и грузов, подразделяется на два специфические раздела: *пассажирский* и *грузовой* транспорт. Внутри каждой группировки происходит разделение активности по технологическому принципу. Каждый из элементов транспортной структуры характеризуется своим набором показателей, которые не являются строго сопоставимыми. Внутри группировок выделяются по технологическому принципу: *наземный* (автомобильный, железнодорожный и трубопроводный), *авиационный*, *водный* (морской и внутренних водных путей) виды транспорта. Кроме того, для автомобильного транспорта, как наиболее массового, анализ проводится с выделением типовых транспортных средств (*легковые автомобили, автобусы, грузовые автомобили, мотоциклы и пр.*) в разрезе городского и загородного использования.⁴

В 2015 г. суммарное потребление конечной энергии в целом по миру составило 9384 млн. т н.э., в том числе 2703 млн. т н.э. (28,8%) было израсходовано на нужды транспорта, из которых 92% приходилось на жидкое топливо (бензин, дизельное топливо, авиакеросин и пр.), 3,6% на природный газ, 1,3% на электроэнергию.⁵ Из 3820 млн. т н.э. жидкого топлива, поступившего для конечного потребления, почти 65% (2485 млн. т н.э.) было израсходовано на транспортные услуги по сравнению с 45% 1007 в млн. т н.э.) в 1973 г. (рост почти в 2,5 раз).⁶ Наиболее крупным потребителем энергии в транспортном секторе являются пассажирские перевозки, на долю которых приходится почти 2/3 энергопотребления в транспорте:⁷

| | млн. т н.э. | % от мирового (2012) ⁸ , го потребления транспортом | % внутри группы транспорт- ных перевозок |
|-------------------------------|-------------|---|---|
| Пассажирские перевозки | 1587 | 63% | 100,0% |
| легковые авто | 1134 | 45% | 71% |
| авиация | 277 | 11% | 17,5% |
| автобусы | 126 | 5% | 7,9% |
| прочие виды | 50 | 2% | 3,6% |

⁴Обширные данные по развитию транспорта в мире и в крупных странах приведены в статистических материалах UN Statistical Division, World Bank, International Monetary Fund, International Energy Agency, USDOE, Eurostat.

⁵Рассчитано по *Key world energy statistics*, IEA, 2017.

⁶ Некоторые несовпадения в цифрах объясняется использованием различных коэффициентов пересчета видов жидкого топлива в тонны нефтяного эквивалента.

⁷ US EIA (Energy Information Administration), Information Transportation Energy Demand Departments (TEDO-2015) model estimates

⁸ Оценено автором по U.S. Energy Information Administration | International Energy Outlook 2016. Ch. 8 Transportation sector Energy consumption, Sept. 2017.

| | | | |
|---------------------------|-------------|-------------|---------------|
| Грузовые перевозки | 931 | 37% | 100,0% |
| тяжелые грузовики | 302 | 12% | 32% |
| прочие грузовые авто | 302 | 12% | 32% |
| морские перевозки | 277 | 11% | 29,9% |
| железные дороги | 50 | 2% | 6,1% |
| Всего транспорт | 2518 | 100% | 100% |

В пассажирских перевозках преобладают легковые авто, 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 (road-transportation), где сегодня преобладают двигатели внутреннего сгорания (ДВС). *В первом приближении можно считать, что это направление представляет наибольший интерес для массового использования альтернативных видов энергоресурсов и технологий, поэтому далее будем рассматривать состояние только этого вида транспорта.*

Как видно из приведенных выше данных, около 45% потребления энергии на транспорте реализуется легковыми автомобилями (или 71% всех расходов на все пассажирские перевозки).⁹ Крупнейшим потребителем энергии на транспорте являются США, на долю которых приходится 25% (2012 г.) мирового потребления энергии транспортом, из которых около 62% этой энергии в стране расходуется дорожным транспортом. В Западной Европе эта доля составляет 15% от мирового потребления, из которых около 52% в регионе потребляется дорожным транспортом. Китай находится на третьем месте с 12% мирового потребления, где всего 26% приходится на дорожный транспорт.¹⁰

Между тем, непосредственный расход энергии автотранспортом 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.¹¹

Далее в тексте основное внимание уделено перспективам развития легкового пассажирского автотранспорта как основного сектора для применения новых альтернативных видов топлива.

Величина потребления энергии на легковом транспорте прежде всего определяется тремя факторами:

- а) типом двигателя как энергетической машины,

⁹Рассчитано по US EIA, Passenger Travel Accounts for Most of the world transportation Energy Use. November 19, 2015 (<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=23832>).

¹⁰ В России потребление энергии на транспорте составляет всего 3% от мирового потребления, при этом на долю дорожного транспорта в этих расходах приходится 52%.

¹¹Поданным J.-P. Rodrigue, C. Comtois and B. Slack, The Geography of Transport Systems, 4th Edition, Routledge, July 2009.

- б) энергетическими параметрами транспортных средств,
- б) величиной парка автомобилей,
- в) объемом работы автомобилей.

Двигатель автомобиля как энергетическая машина. В недалеком прошлом и в настоящее время основным видом автотранспорта (пассажирского или грузового) является *автомобиль с ДВС*, источником энергии для которого являются жидкие или газообразные углеводородные топлива.

Традиционные автомобили с двигателем внутреннего сгорания на бензине имеют относительно низкую энергетическую эффективность, так как в них в полезную работу (крутящий момент) преобразуется всего лишь около 15-20% энергии топлива. Стандартный дизельный двигатель имеет несколько более высокий КПД (до 25-40%), а КПД дизелей с турбонаддувом и промежуточным охлаждением доходят даже – до 50%.

В выхлопных газах дизельного двигателя меньше окиси углерода (СО), чем у бензинового. Важным аспектом дизельного топлива является бóльшая безопасность, так как оно хуже испаряется, что снижает вероятность возгорания дизельных двигателей по сравнению с бензиновыми. Явными недостатками дизелей является необходимость использования стартера бóльшей мощности, возможное осаждение парафинов в системах топливоподачи при низких температурах, сложность и относительная дороговизна ремонта топливной аппаратуры. Дизельные моторы крайне чувствительны к загрязнению топлива механическими частицами и водой. Около 70-75% энергии, используемой автомобилем, расходуется в самом двигателе, включая полезную энергию, а остальные 15-20% идут на возмещение потерь от двигателя до колеса и прочие потери. Работа ДВС на природном газе, пропан-бутановых смесях и других легких углеводородах практически ничем не отличается от бензиновых двигателей.

Принципиально новым двигателем является электромотор, где используется сила трансформации электроэнергии в механическую работу. При этом источниками электроэнергии могут являться электроэнергия, вырабатываемая за пределами автомобиля на электростанциях и сохраняемая в электроаккумуляторах (*электромобиль*), или из водорода, производимого за пределами автомобиля из традиционных топлив, сетевой электроэнергии или на базе возобновляемых источников энергии, и сохраняемого на борту автомобиля в специальных емкостях в сжатом или сжиженном виде и трансформируемого на борту автомобиля в электроэнергию в электро-химических генераторах (*топливные элементы – ТЭ*). Подробнее об этом см. ниже.

Энергетические параметры автомобилей сильно влияют на расходы топлива. Одним из таких параметров является средняя мощность автомобиля, которая определяет комфортность, надежность, скорость и маневренность езды, безопасность. Характерные изменения параметров автомобилей легко

проследить по данным ЕС за последние годы.¹² Средняя мощность двигателя легковых автомобилей в ЕС увеличилась до 95 кВт, что на 30% больше, чем была в начале 2000-х годов. Статистика веса транспортных средств и выбросов CO₂ показывает, что страны с преобладанием более крупных и более тяжелых автомобилей имеют самые мощные автопарки. Так, парк Германии является значительно более мощным, чем в среднем по ЕС (средняя мощность авто составляет 109 кВт против 95 кВт), в то время как BMW, Mercedes-Benz и Audi производят автомобили даже выше средней мощности - 140, 131 и 132 кВт, соответственно. На другом конце шкалы оказались французские, итальянские и голландские парки с мощностями около 80 кВт, а Fiat - около 70 кВт. Современные модели автомобилей намного тяжелее, чем их предшественники. Так, Fiat 500 сегодня весит в два раза больше, чем та же модель, которая выпускалась в 1960-х и 1970-х годах. Основные причины увеличения веса и мощности автомобилей заключаются в увеличении требований к безопасности, а также появление широкого круга дополнительного оборудования, которого не было еще 10-15 лет тому назад, в т.ч. оборудованию мультимедиа на борту и климат-контроль. Размер моделей автомобилей также увеличивался с течением времени, но в меньшей степени, чем их вес.

По мере роста средней мощности автомобилей, средний вес новых автомобилей в ЕС увеличился в 2016 г. до 1392 кг. Это примерно на 10% выше, чем за 15 лет до этого. Как немецкие, так и шведские новые автомобили были значительно тяжелее, чем в среднем по ЕС - 1468 и 1562 кг, соответственно. Подобные тенденции характерны для большинства регионов мира.¹³

За период с 2000 г. средняя мощность легковых автомобилей в ЕС при оценке по классам автомобилей возросла с 75 кВт до 95 кВт. Наиболее заметное увеличение мощности наблюдалось в автомобилях люкс-класса, спортивных и тяжелых внедорожниках. Мощности легких автомобилей (класс мини, малые, ниже среднего) остались практически неизменными. Особенно впечатляет прогресс в электромобилях, мощности которых за период 2000-2015 гг. возросли с 50-55 кВт до 95 кВт, что явилось следствием прогресса в совершенствовании электроаккумуляторов. Характерной особенностью также является выпуск более мощных дизельных автомобилей по сравнению с бензиновыми (100 кВт и 83 кВт, соответственно).

Одновременно с изменением мощностных и весовых параметров автомобилей происходило совершенствование экономичности и экологичности транспортных средств. Удельный расход топлива и выбросы CO₂ в ЕС за период с 2001 г. и сократились практически на 30%, благодаря совершенствованию двигателей и повышению качества топлив.

¹² ICCT (International Council on Clean Transportation). *European Vehicles Market Statistics. Pocket book 2017/18*. <https://www.theicct.org/publications/european-vehicle-market-statistics-20172018>

¹³ Там же.

Производство и парк автомобилей. В 2015 г. мировое производство легковых автомобилей составляло 55,8 млн. (рост по сравнению с 2000 г. на 35%). Крупнейшими производителями легковых авто являются (2015 г.): Китай – 12 млн. (21,3%), Япония – 7,8 (14%), Германия – 5,7 (10,2%), США – 2 (7,5%). При этом производство в Китае за период с 2000 г. увеличилось почти в 20 раз, в Индии – в 4,2 раза, в Бразилии – в 1,5 раза, в Мексике – в 1,7 раза.¹⁴ В период 1965-2015 гг. годовое производство легковых автомобилей в мире возросло в 4 раза (с 18 млн. авто до 72 млн.), а парк увеличился в почти в 7 раз (с 135 млн. авто до 925 млн.).

Одновременно выпуск грузовых автомобилей и автобусов к 2015 г. составил 34,4 млн. по сравнению с 17,7 млн. в 2000 г. (рост почти в 2 раза). В этой области наибольший прогресс наблюдался в Китае, где выпуск грузовых автомобилей в 2015 г. достиг 12,5 млн. по сравнению с 1,5 млн. в 2000 г. (рост в 7,5 раз). Далее располагаются: США – 7,9 млн. в 2015 г. (рост к 2000 г. всего на 9%), Р. Корея – 2,2 млн. (рост 325%), Индия – 1,6 млн. (рост в 4,6 раза).¹⁵

В результате количество зарегистрированных легковых автомобилей в 2015 г. в целом по миру возросло до 923,6 млн. авто по сравнению с 548,5 млн. в 2000 г. и 444,9 млн. в 1990 г. (среднегодовой рост парка легковых автомобилей увеличивался в период 1990-2015 г. на 3% в год). По числу зарегистрированных легковых автомобилей наиболее крупный парк наблюдается в Китае, где в 2015 г. было зарегистрировано более 135 млн. авто по сравнению с 3,7 млн. в 2000 г. (среднегодовой рост парка составил 18,6%!). На втором месте находятся США с 126 млн., далее располагаются: Япония – с 61,9 млн. авто (среднегодовой рост в период 1990-2015 гг. 2,3%), Германия – 45 млн. (1%), Россия – 41 млн. (4,8%), Бразилия – 33,6 млн. (4,2%), Великобритания – 33,5 млн. (1,6%).¹⁶

Важным показателем насыщенности рынка автомобилей является количество авто на 1000 чел. населения. В целом по миру количество легковых автомобилей за 10-летний период 2005-2015 гг. увеличилось на 26% и достигло 182 авто на 1000 чел. В том числе показатель насыщенности внутреннего рынка составил в 2015 г. в США 820 авто на 1000 чел. (снижение по сравнению с 2005 г.) на 2%), в Китае – 116 авто (рост в 4,3 раза), в России - 299 авто (рост на 38%), в Индии – 33 авто (рост в 3 раза).¹⁷

Количество автомобилей на 1000 чел. в значительной мере зависит от роста доходов населения. По мере экономического развития происходит увеличение количества легковых автомобилей, используемых в стране. При этом при современных тенденциях развития автотранспорта кривая обеспеченности населения автомобилями выходит на насыщение при

¹⁴ORNL (Oak Ridge National Laboratory). *Davis S.C., Williams S.E., Bounty R.G. Transportation Energy Data Book*, Edition 36.1, April 2018 (eta.ornl.gov/data).

¹⁵Там же.

¹⁶Там же.

¹⁷ ACEA (European Automobile Manufacturers Association). *The Automobile Industry Pocket Guide 2017-2018*. www.acea.be

приближении к величине 750-850 авто/1000 чел., что сегодня уже характерно для США.¹⁸

Работа транспортных средств. Важным показателем транспортных средств, определяющим расходы топлива и выбросы в окружающую среду, годового оборот, равный произведению расстояния пробега на объем перевозок. Для грузового транспорта этот показатель называется грузооборотом, а для пассажирского – пассажирооборотом. Статистика по глобальным показателям неполная, противоречивая, разнокалиберная и начала формироваться только в последнее десятилетие. В табл.1 приведены оценки по пассажирообороту различных транспортных средств.¹⁹ Как следует из данных таблицы, в 2015 г. работа пассажирского транспорта оценивается величиной почти 50 трлн. пасс.-км, из них почти 2/3 приходилось на дорожные перевозки, где применяется в основном ДВС (без учета прочих видов транспорта, использующего в преобладающем объеме также ДВС).

Таблица 1. Глобальная оценка пассажирских перевозок в 2015 г., млрд. пасс.-км

| <i>Вид транспорта</i> | <i>Тип</i> | <i>млрд. пасс.-км</i> | <i>%</i> |
|------------------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------|
| Воздушный | внутренние линии | 2300 | |
| | международные линии | 4600 | |
| | Всего | 6900 | 13,9% |
| Железнодорожный | городской | 1500 | |
| | вне городов | 4000 | |
| | Всего | 5500 | 11,1% |
| Дорожный | городской | 14100 | |
| | вне городов | 18000 | |
| | Всего | 32100 | 64,8% |
| Прочие виды транспорта (мотоциклы) | городской | 3500 | |
| | вне городов | 1500 | |
| | Всего | 5000 | 10,2% |
| Итого | по всем категориям | 49500 | 100,0% |

Источники: рассчитано автором на базе материалов International Transport Forum, ITF Transport Outlook 2017.

¹⁸ Но этот вывод не является универсальным. Скорее всего, можно ожидать, что в перспективе 15-25 лет эта тенденция может измениться под влиянием интенсивного перехода на новые принципы развития общественного транспорта, в частности за счет повышения комфортности, скорости передвижения, каршеринга и т.п.

¹⁹ Надежные данные по работе транспортных средств имеются только по странам ОЭСР. Все остальные носят приблизительный характер.

Для сравнения в 2015 г. грузооборот мирового транспорта составил около 120 трлн. т-км, в т.ч. почти 73% работы приходилось на морской транспорт, 14% - на автотранспорт, 12% - на железнодорожный транспорт и менее 1% на авиацию.²⁰

Потребление энергии транспортом. В мировом потреблении энергии сегодня на транспорте преобладают два вида топлива: автомобильный бензин (включая этанол) и дизельное топливо (включая смеси биодизеля).

В 2012 г. годовое суммарное потребление энергии всеми видами транспорта в мире составило 2596 млн. т н.э., из них 77% приходилось на бензин и дизтопливо. Расходы реактивного топлива в авиации составил 12% от потребления энергии, за которым следуют тяжелые нефтетоплива с 9%. В итоге на долю нефтепродуктов приходится наибольшая доля использования энергии в транспорте. По 1% составляют расходы природного газа, пропан-бутановых смесей и электроэнергии.²¹ В целом на долю перевозки пассажиров и грузов приходится около 25% всего потребления энергии в мире.

В транспортный сектор используется около 65% (2015 г.) сырой нефти, добываемой в мире. Эта доля постоянно растет. Она составляла в 1973 г. около 45% и 58% в 2004 г. При этом из 3820 млн. т н.э. мирового производства нефтепродуктов более 65% приходилось на транспортный сектор, в том числе около 50% было израсходовано при перевозках по дорогам (дорожный транспорт), 7,5% - авиации, 6,7% - в морском транспорте и менее 1% при железнодорожных перевозках.²²

При пассажирских перевозках было израсходовано около 1663 млн. т н.э. (2015 г.) (64% от потребления в транспорте), из них 70% пришлось на легковой автомобильный транспорт, 20% - на авиаперелеты, 6% - на автобусные поездки и 4% - на железнодорожный транспорт. Одновременно потребление топлива в грузовом транспорте составило около 932 млн. т н.э. (36%), из них 62% при перевозках автотранспортом, 30% - морским транспортом и 8% - поездом.²³

Пассажирские перевозки, в частности легкие транспортные средства, потребляют почти 45% энергии, расходуемой в транспортном секторе.

Наиболее крупными потребителями энергии в транспорте являлись США (25% от мирового потребления в транспорте в 2012 г.), Европа (18%), Китай (12%). На долю России приходилось всего около 3%.

Статистика по потреблению энергии в пассажирском транспорте характеризует величину потенциального рынка для альтернативных топлив, в первую очередь электромобилей.

²⁰ Рассчитано по данным OECD/ITF (2017), *ITF Transport Outlook 2017*, OECD Publishing, Paris.

²¹ US Energy information Administration. *International Transportation Energy Demand (ITEDD-2015)*.

²² Там же.

²³ Рассчитано по данным US Energy information Administration. *International Transportation Energy Demand (ITEDD-2015)*.

Загрязнение окружающей среды. Мобильность, обеспечиваемая транспортной активностью, имеет широкий спектр **экологических последствий**, которые должны приниматься во внимание при выборе технологий и видов топлива для обеспечения перевозок пассажиров и грузов. Хотя многие экологические проблемы могут иметь негативные последствия для здоровья, социальная толерантность к внешним воздействиям окружающей среды значительно изменилась. По мере роста доходов и уровня образования общество становится более осведомленным о проблемах окружающей среды и характеризуется меньшей терпимостью к его негативным последствиям. К числу наиболее серьезных экологических последствий от деятельности автотранспорта следует отнести:

1) *Загрязнение воздуха.* Выбросы в атмосферу от загрязняющих веществ, производимых транспортом, особенно с помощью ДВС, связаны с загрязнением воздуха и глобальным изменением климата. Некоторые загрязняющие вещества (NO_x, CO, O₃, VOC и т. д.) могут вызывать респираторные проблемы и усугублять сердечно-сосудистые заболевания. По некоторым оценкам, в 2015 г., по данным журнала Lancet, с загрязнением воздуха было связано 9 млн. смертей (одна шестая от всех смертей в том году на планете),²⁴ хотя вклад транспорта в этот процесс менее ясен в связи с наличием других загрязнителей от энергетики, промышленности, сельского хозяйства и пр. Однако, учитывая, что выбросы транспортом приходятся в основном на уровне дыхания человека, то концентрация вредных веществ оказывается значительно более токсичной, чем от других объектов с более интенсивными системами рассеивания выбросов. В результате в городских районах около 50% всех загрязнений воздуха происходит от автомобильного транспорта. Поскольку загрязнение воздуха является острой проблемой здравоохранения, его общественные воздействия воспринимаются как весьма значимые для общества.

2) *Шум.* Шум как раздражитель может влиять на здоровье человека, а чаще всего на настроение и самочувствие. Шум может проявляться на трех уровнях в зависимости от интенсивности источника шума: психологические нарушения (неудовольствие), функциональные нарушения (нарушения сна, потеря производительности труда, нарушение речи) или физиологические нарушения (проблемы со здоровьем, такие как усталость, повреждение слуха). Шум и вибрация, связанные с поездами, грузовиками и самолетами в окрестностях аэропортов, являются основными раздражителями и обычно связаны со снижением стоимости земли в районах с интенсивным движением транспорта, поскольку они делают эти местности менее востребованными для освоения.

3) *Качество водных ресурсов.* Случайный и нормальный сток загрязняющих веществ от транспорта, таких как разливы нефтепродуктов, слив

²⁴<https://hi-tech.mail.ru/review/kak-ehlektromobili-zahvatyvayut-mir-i-pochemu-rossiya-oprotivlyaetsya/#a01>

загрязненной воды при мойке автомобилей, являются источниками загрязнения как поверхностных, так и грунтовых вод.

4) *Изъятие земли.* Транспорт является крупным потребителем пространства, когда рассматриваются его вспомогательная инфраструктура и оборудование (дорожная сеть, паркинги, автостоянки). Это пространство конкурирует с другими видами деятельности и отражает общественную ценность территорий. Кроме того, планирование, связанное с развитием транспортной инфраструктуры, не всегда учитывает эстетические ценности, как это часто бывает при строительстве городских автомагистралей. Эти визуальные воздействия оказывают влияние на качество жизни людей, проживающих в близлежащих территориях.

5) *Влияние на глобальное изменение климата.* Как известно, изменение климата прежде всего связано с выбросами углерода в атмосферу. Наиболее значимыми компонентами этого процесса являются парниковые газы, которые включают: диоксид углерода (CO₂) от сжигания топлива (65%); диоксид углерода (CO₂), образующийся в результате деятельности лесного и сельского хозяйства; метан (CH₄), поступающий в атмосферу в процесс дыхания растений и утечек при добыче и транспорте природного газа (16%); окислы азота (N₂O_x), возникающие при сжигании топлив (6%); фторсодержащие газы (HFCs, PFCs и SF₆), используемые в промышленности, холодильном хозяйстве и производстве различных химических продуктов (2%).²⁵

Основными источниками парниковых газов являются: электроэнергетика (генерирование электроэнергии и производство тепла) – 25%, сельское хозяйство – 24%, промышленность – 21%, транспорт – 14%, население – 6% и прочие источники – 10%.²⁶

Новые технологии в организации использования транспортных средств. К наиболее революционным прорывам технологического и организационного характеров в автотранспорте следует отнести появление на дорогах беспилотных автомобилей и группового использования легковых автомобилей.

1) *Беспилотные автомобили (autonomous driving)* становится реальностью. Многие компании заявляют о своей приверженности разработке и запуску автономных транспортных средств, и во многих из этих объявлений отмечается «уровень» разрабатываемой автономии.

Автомобиль с самостоятельным вождением (иногда называемый автономным автомобилем или беспилотным автомобилем) - это автомобиль, в котором используется комбинация датчиков, камер, радаров и искусственного интеллекта для перемещения между пунктами назначения без оператора-человека. Автономная управление транспортными средствами приводит к

²⁵ IPCC (2014). *Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the International Panel on Climate Change.*

²⁶ Там же.

снижению дорожно-транспортных происшествий, заторов, сокращению выбросов, обеспечивает более эффективную парковку, сокращает транспортных расходов. Несмотря на определенные трудности и опасения, сегодня уже трудно отрицать преимущества новой технологии.

Сегодня крупные автомобильные компании, разрабатывающие автономные автомобили, включая Audi, BMW, Ford, Google, General Motors, Tesla, Volkswagen и Volvo, приступили к активному производству и тестированию автономных транспортных средств.

Существует 5 различных уровней автоматизации вождения, различающихся степенью усложнения процесса автоматизации:

Нулевой уровень - без автоматизации, когда водитель выполняет все рабочие задачи, такие как рулевое управление, торможение, ускорение или замедление автомобиля.

1-й уровень - обеспечивает помощь водителю. На этом уровне система выполняет некоторыми функциями управления, но водитель по-прежнему контролирует ход ускорения, торможения и контроля за окружающей обстановкой.

2-й уровень - частичная автоматизация. На этом уровне автоматизированная система позволяет водителю отказаться от некоторых своих задач, но водитель должен быть готов всегда взять на себя управление транспортным средством и он по-прежнему отвечает за большинство критически важных для безопасности функций и весь мониторинг окружающей обстановки. Начиная с уровня 3, транспортное средство само контролирует весь мониторинг окружающей обстановки при помощи датчиков. На этом уровне внимание водителя по-прежнему имеет решающее значение, но он может отключиться от «критически важных для безопасности» функций, таких как торможение, и оставить его на усмотрение системы управления, когда условия езды вполне безопасны. Многие современные автомобили уровня 3 уже не требуют постоянного человеческого внимания на дорогах при движении со скоростью до 60 км в час. Компания Audi и ряд других приступила к выпуску автономных автомобилей 3-го уровня в 2018 г.

4-й уровень - высокая автоматизация. На уровнях 4 и 5 система способна самостоятельно управлять, тормозить, ускорять, контролировать движение транспортного средства и наблюдать за проезжей частью, а также реагировать на события как смена полосы движения, поворот и использование световых и звуковых сигналов. При этом на уровне 4 автономная система вождения сначала уведомляет водителя о безопасных условиях, и только после этого водитель переключает автомобиль в этот режим. Но на этом уровне система еще не способна определить характер движения, как например, наличие пробок на дороге или выезд на дороги с более интенсивным движением.

5-й уровень - полная автоматизация. Это наиболее продвинутый уровень с точки зрения участия человека в управлении автомобилем. На этом уровне абсолютно не требуется внимания человека за ходом движения. Автономная

система автомобиля контролирует все критические задачи, мониторинг окружающей обстановки и определение уникальных условий движения, как пробки и другие препятствия и сложности.

Автомобили с 5-ым уровнем автоматизации могут появиться через несколько лет, потому что для перехода к этому уровню предстоит преодолеть множество технологических и организационных трудностей и решить ряд важных вопросов использования автономного автотранспорта на дорогах общего пользования.

2) *Carsharing*. Это новая модель организации проката автомобилей, когда люди арендуют автомобили для совместного использования при поездках на короткие промежутки времени или небольшие расстояния, чаще всего в городах. Основными факторами, стимулирующими рост доли коллективных автомобильных перевозок, являются растущие уровни заторов на дорогах, с которыми сталкиваются горожане; изменение мышления о владении автомобилем; растущие расходы на владение личным транспортным средством и конвергенция бизнес-моделей организации транспорта в городах. Carsharing способствует устойчивому развитию транспорта, поскольку он является менее интенсивным автомобильным транспортным средством в городских условиях, способствует уменьшению пробок на дорогах и сокращает загрязнение воздуха. Замена частных автомобилей на коллективные напрямую снижает спрос на парковочные места. Все это приводит к экономии времени использования транспортных средств.

Согласно журналу *Economist*, ожидается, что совместное использование автомобилей позволит сократить количество владельцев автомобилей в расчете на одну арендуемую машину до 15 принадлежащих этим людям автомобилей.²⁷ Carsharing является частью более широкой тенденции общей мобильности населения. Совместная мобильность включает в себя все виды путешествий, которые предлагают кратковременный доступ к перевозке на платной основе, необходимой либо для личного транспорта, либо для доставки товаров. Услуги по carsharing доступны в более чем 1000 городах в нескольких странах мира. По данным Navigant Consulting, глобальный доход от услуг carsharing в 2013 г. достиг около 1 млрд. долларов США, а к 2020 г. вырастет до 6,2 млрд. долларов США. Число участников в carsharing по всему миру превышает 12 млн. человек.²⁸

3) *Планирование развития городской среды*. Одна из основных задач планирования развития городской среды состоит в улучшении развития городского транспорта, предусматривающее сокращение потерь времени на перемещение людей и грузов, расходов топлива, снижение перерасходов энергоресурсов и связанных с этим загрязнений городской среды вредными

²⁷ "Seeing the back of the car". The Economist. 22 September 2012. Retrieved 6 February 2016.

²⁸ Navigant Research (22 August 2013). "Navigant forecasts global carsharing services to grow to \$6.2B by 2020". Green Car Congress. Retrieved 6 February 2016.

выбросами, влекущими за собой рост заболеваемости населения и преждевременной смертности, снижение работоспособности рабочих и служащих и связанных с этими факторами нарушениями в работе городского транспорта. Все эти потери в значительной мере возникают в результате перегруженности городских дорог и образовании пробок на дорогах. Для борьбы с этими явлениями в городских муниципалитетах проводятся разработки стратегий развития городской среды, способной улучшить ситуацию с городским трафиком с целью устранения негативных явлений и связанных с ними потерь, которые постоянно возрастают в связи с ростом населенности городов и душевых расходов горожан. Все это приводит к быстрому увеличению парка автомобилей (гораздо большему, чем изменяется планировка городов).

По данным за 1982-2014 гг. совместного исследования ситуации на автодорогах в 471 крупных городах США,²⁹ показано, что, если не считать серьезных экономических проблем в стране, заторы на дорогах будут продолжать расти, если проекты, программы и политика развития городских территорий не будут развиваться. В 2014 г. из-за заторов городские жители страны потеряли в пробках около 6,9 млрд. часов и израсходовали дополнительно 3,1 млрд. топлива стоимостью 160 млрд. долл. На долю грузовых автомобилей в этих расходах приходится 28 млрд. долл. (17%), что намного больше, чем их вклад в общий трафик (7%). В 2014 г. в 95 из 100 крупнейших районов метрополиях Америки наблюдалось увеличение пробок по сравнению с 2013 г., где этот рост наблюдался только в 61 города. В результате среднее время поездок на крупных автострадах при слабой загруженности увеличилось с 20 мин. до 48 мин. Это привело к тому, что перерасход топлива на легковом автотранспорте возрос с 4 галлонов на один автомобиль в 1982 г. до 19 галлонов в 2014 г., что эквивалентно увеличению потерь в результате задержек в пути по причине пробок с 400 долл. на один автомобиль в 1982 г. до 960 долл. в 2014 г. (в пересчете на цены 2014 г.).

В целом по стране с учетом грузового автотранспорта потери времени в пути возросли с 1,8 млрд. час. в 1982 г. до 6,9 млрд. час. в 2014 г., что привело к перерасходу топлива, соответственно, с 0,5 млрд. галлонов до 3,1 млрд. галлонов, а потери в пробках увеличились с 42 млрд. долл. в 1982 г. до 160 млрд. долл. в 2014 г. (в ценах 2014 г.).

Все это указывает на большую важность совершенствования транспортной инфраструктуры в городах США для снижения потерь на перевозках пассажиров и грузов. Аналогичная ситуация наблюдается в других странах мира. Совершенно очевидно, что для решения этой задачи потребуются подходы с двух сторон: 1) увеличение возможности транспортной инфраструктуры путем расширения пропускных способностей дорог, организации стоянок

²⁹2015 URBAN MOBILITY SCORECARD. Published jointly by The Texas A&M Transportation Institute and INRIX. <http://www.mobility.tamu.edu>

автотранспорта, ориентация доли мобильности населения на групповое использование транспортных средств (общественный транспорт, carsharing и т.п.) и 2) за счет перехода к беспилотному управлению автотранспортом, использованию более дешевых видов личного транспорта, в том числе на альтернативные виды топлива и новые виды транспорта за счет снижения доли двигателей внутреннего сгорания и увеличения менее экологически опасных транспортных средств, как электромобили и/или автомобили на водороде с топливными элементами, которые в обозримой перспективе могут значительно подешеветь и сократить затраты на перевозки.

2. Альтернативные виды топлив и технологий в автотранспорте

Требования к моторным топливам для двигателей внутреннего сгорания (ДВС). 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%.³⁰

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 лучшей самовоспламеняемости используются в двигателях с воспламенением от сжатия, т.е. дизелях.

Исторически сложилось, что в последние полвека основным видом моторного топлива выступали жидкие углеводородные топлива (прежде всего – бензины и дизельное топливо). Эти топлива относятся к *традиционным видам* моторного топлива. Преобладание нефтяных топлив в автотранспорте является следствием относительной простоты организации процесса их получения, хранения и использования. Между тем, существуют и другие виды углеводородных топлив (природный газ, биотоплива, пропан-бутановые смеси, метанол, генераторные газы на базе угля, древесины, торфа и т.п.), которые также могут быть использованы в качестве моторных топлив в ДВС. Целесообразность их использования определяется в основном ценами на моторные топлива и доступностью их на внутреннем рынке. Большие перспективы в части использования в транспортных средствах открываются для электроэнергии, которая трансформируется в работу в электродвигателе (*электромобиль или автомобиль с топливным элементом, работающий на водороде или углеводородных топливах*). Эта группа энергоносителей образует

³⁰ <https://myfin.by/wiki/term/skolko-benzina-poluchaetsya-iz-barrelya-nefti>

группу *альтернативных моторных топлив*. Однако, в современных условиях они часто требуют более сложной системы получения, хранения и использования, поэтому по энергетическим и экономическим соображениям применение их в лучшем случае пока носит ограниченный характер.

К автомобильным моторным топливам предъявляются следующие основные требования:³¹

- 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.

Основной вопрос, связанный с широкомасштабным использованием альтернативных видов топлива для транспортных средств, заключается в размере инвестиций, требуемых для организации получения этих топлив, доставки их до заправочной станции и превращение в работу на колесе автомобиля. Другая проблема заключается в том, что с точки зрения плотности энергии альтернативные виды топлива имеют более низкую эффективность, чем традиционные бензин и дизельное топливо, и, следовательно, требуют большего объема бортового хранилища для обеспечения эквивалентного расстояния перевозки и производительности по сравнению с бензиновым или дизельным двигателем.

Наиболее перспективными альтернативами моторными топливами для развития транспортных средств сегодня являются: *природный газ, синтетические моторные топлива, биотоплива, электроэнергия и водород*.

2.1. Природный газ

В настоящее время в транспортных средствах используются две формы природного газа: *сжатый природный газ (СПГ)* и *сжиженный природный газ (СЖГ)*. 1 м³ природного газа содержит приблизительно 37 - 40 МДж, т.е. примерно такое же количество энергии, как 1 литр дизельного топлива. Для сравнения энергосодержание 1 л бензина составляет 34 МДж, пропан-бутана - 25,4, сжиженного природного газа – 25.

СПГ получается путем сжатия природного газа. СПГ хранится на борту транспортного средства в сжатом состоянии. Транспортный агрегат

³¹Госстандарт. Топливо (<http://auto.gosstandart.info/avtohimiya/toplivo/>)

наСПГ демонстрирует примерно такую же экономию топлива, как и обычный бензиновый автомобиль на основе жидких углеводородов.

СЖГ- это природный газ в сжиженной форме при охлаждении до -162°C . Из-за относительно высокой себестоимости получения СЖГ, а также необходимости ее хранения в специализированных криогенных резервуарах широкое распространение сжиженного топлива в коммерческих приложениях было ограничено. Транспортные средства на природном газе в части развиваемой мощности, ускорения и крейсерской скорости практически сопоставимы с работающими на жидких углеводородах.

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.

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.

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.³² 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.

В табл. 2 приведены данные по состоянию автопарка газифицированных автомобилей в ряде стран. Более половины мирового парка газифицированных автомобилей находится в странах Азии (Китай, Иран, Индия) и Южной Америки (Аргентина, Бразилия). Из европейских стран наиболее выделяется Италия, где эксплуатируются более 1 млн. газифицированных автомобилей.

Таблица 2. Страны с наиболее крупными парками газифицированных автомобилей (26 апреля 2018 г.).

| <i>Кол-во авто на природном газе,</i> | <i>Насыщение внутреннего рынка</i> |
|---------------------------------------|------------------------------------|
|---------------------------------------|------------------------------------|

³² NGV Global. The Natural Gas Vehicle Knowledge Base, <http://www.ngvglobal.org>

| тыс. (%) | | | газифицированными автомобилями, тыс. (%) | | |
|------------|------|-------|---|------|-----|
| Китай | 8350 | 21,3% | Армения | 300 | 69% |
| Иран | 4502 | 17,9% | Боливия | 400 | 52% |
| Индия | 3079 | 12,2% | Пакистан | 3000 | 33% |
| Пакистан | 3000 | 11,9% | Иран | 4502 | 32% |
| Аргентина | 2295 | 9,1% | Узбекистан | 480 | 23% |
| Бразилия | 1791 | 7,1% | Бангладеш | 220 | 11% |
| Италия | 1004 | 4,0% | Перу | 256 | 10% |
| Колумбия | 572 | 2,3% | Аргентина | 2295 | 10% |
| Таиланд | 474 | 1,9% | Грузия | 80 | 8% |
| Узбекистан | 450 | 1,8% | Колумбия | 572 | 5% |

Источник: NGV Global Knowledge, Current Natural Gas Vehicle Statistics, [http://www.iangv.org/curren-
ngv-stats/](http://www.iangv.org/curren-
ngv-stats/)

2.2. 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.³³

Конверсия угля в жидкие углеводороды. 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*.

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

Для конверсии угля в жидкое топливо предложено два подхода;

Непрямое сжижение – это апробированная технология, используемая в настоящее время компанией Sasol (ЮАР). На первой стадии переработки происходит газификация угля водяным паром для получения синтез-газа (смесь H₂ и CO). После удаления сернистых соединений и твердых частиц

³³ Использованы материалы магистерской диссертации Колпакова А.Ю. (научный руководитель – Синяк Ю.В.).

синтетиз-газ участвует в реакции с применением катализатора при относительно низком давлении и температуре. Состав конечных продуктов зависит от типа реакции и катализатора. Для метода непрямого сжижения характерно получение ультрачистого топлива. Этот метод хорошо подходит для целей улавливания и хранения соединений углерода, хотя процесс менее эффективен (общая энергоэффективность – примерно 40%) и обеспечивает получение топлива с меньшей теплотворной способностью.

Прямое сжижение – это потенциально более эффективный метод (общая энергоэффективность процесса – 60–70%). Существуют несколько разновидностей этого подхода, однако основными характеристиками процесса являются растворение угля в насыщенном водородом растворителе при высокой температуре и давлении, затем осуществляется гидрокрекинг смеси с использованием катализатора. Метод прямого сжижения используется компанией *Shenhua* (Китай). Помимо более высокой эффективности этот метод обеспечивает корректировку состава конечных продуктов. Полученные нефтепродукты требуют рафинирования перед поступлением на рынок. Недостатками метода являются высокие эксплуатационные издержки и более высокий уровень выбросов CO_2 .

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.

Экономика получения СЖТ зависит от производственных затрат и размеров производства. Цена угля, инвестиции в производство и специфика локальных условий являются основными факторами для оценки затрат в производство продукта. Величина выручки определяется в основном ценой сырой нефти, из которой получают конкурирующие нефтепродукты. Получение СЖТ из угля сопровождается двукратным увеличением выбросов CO_2 в атмосферу. В условиях борьбы с изменениями климата это недопустимо. Поэтому разработаны технологии удаления CO_2 с последующим полезным использованием, например, для интенсификации добычи нефти, или захоронением в соответствующих средах.

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

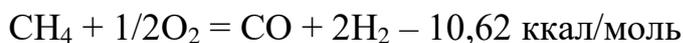
промышленные выбросы станут существенной проблемой для окружающей среды.

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.

Конверсия природного газа в жидкие углеводороды. 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.

Синтез-газ из природного газа получают с помощью технологических процессов, которые можно разделить на две большие группы:

- 1) парциальное окисление метана



- 2) паровой риформинг

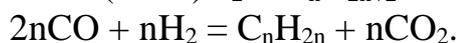
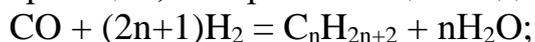


В каждой из этих реакций образуется CO_2 , который вступает в реакцию с метаном для получения дополнительного количества CO и H_2 :



Этот процесс, с одной стороны, позволяет использовать избыток CO_2 , образующийся в других технологических процессах, уменьшая объемы вредных выбросов, и, с другой стороны, служит рычагом управления составом синтез-газа.

На третьей стадии осуществляется процесс Фишера-Тропша с использованием синтез-газа. Этот процесс можно рассматривать как восстановительную олигомеризацию монооксида углерода в результате сложной комбинации реакций, которые в общем виде имеет следующий вид:



Состав конечных продуктов зависит от катализаторов, температуры и соотношения CO и H_2 .

Основными продуктами технологии GTL являются прямогонные бензины (нафта), дизельное топливо, сжиженные газы и высокомолекулярные парафины.

Нафта (легкие бензиновые фракции): имеет благоприятный фракционный состав, не содержит ароматических углеводородов и серы. Указанные свойства позволяют использовать продукт как высококачественное нефтехимическое сырье при производстве этилена и пропилена. Нафта также имеет широкое применение в нефтехимической промышленности.

Дизельное топливо: имеет высокое цетановое число (60-70 по сравнению с 40-50 у дизельного топлива, получаемого на нефтеперерабатывающих заводах). Дизельное топливо из природного газа практически не содержит серы и имеет

очень низкое содержание ароматических углеводородов. Учитывая тот факт, что нефтепереработчикам для удовлетворения все ужесточающихся требований к охране окружающей среды, в частности, с целью удаления серы из дизельного топлива, приходится нести большие издержки, то дизельное топливо по технологии GTL можно использовать для смешения с обычным нефтезаводским дизельным топливом, снижая затраты и обеспечивая повышенные экологические характеристики топлива.

Кроме дизельного топлива, существуют и другие продукты (масла, воски и нафта), которые представляют интерес для потребителей. Высокомолекулярные парафины, получаемые по технологии GTL, - парафины, церезины, воски, находящие применение для получения синтетических масел, смазок, присадок, поверхностно-активных веществ, химико-фармацевтической продукции. Наиболее привлекательный рынок для синтетических топлив может стать рынок смазочных материалов; мировой спрос на высококачественные смазки вырастет в период до 2020 г. на 15%, что вынуждает нефтепереработчиков расширять мощности по производству смазок.

Тяжелые парафины, производимые по технологии GTL, не имеют в своем составе серы; они высоковязкие; имеют низкие показатели разлива и летучести и являются лучшим базовым сырьем для производства смазок по сравнению с продуктами нефтепереработки.

2.3. Биотопливо

Продукты растительного происхождения 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.

Наиболее массовыми видами биотоплива являются *биодизель* и *биоэтанол*.

Биодизель - нетоксичное, биоразлагаемое топливо, полученное из растительных жиров и отходов производства при переработке растительной продукции, а также животного или рыбьего жира. Биодизель получается в процессе переэтерификации, в результате чего метанол и гидроксид натрия смешиваются с жирами и образуется биодизель. Биодизель имеет ряд экологических преимуществ по сравнению с традиционным дизельным топливом. При смешивании биодизеля с традиционным дизельным топливом снижаются выбросы загрязняющих веществ с выхлопными газами. Однако использование биодизеля может привести к увеличению выбросов смога, образующих оксиды азота.

Биодизель можно использовать на всех автомобилях в смеси с дизельным топливом. Современные транспортные средства, построенные за последние 15-20 лет, могут использовать чистое биодизельное топливо, хотя многие транспортные средства требуют некоторой модификации двигателя.

Биодизель в настоящее время стоит в 1,5-2 раза выше, чем обычное дизельное топливо. Цена на биодизель зависит от цен на исходное сырье (рапс, подсолнечник, соевые бобы, являющихся основными культурами для получения биодизеля).

В 2012 г. в мире было получено 24 млрд. л биодизеля. В расходах на производство биодизеля преобладают затраты на сырье. В период с 2005 по 2012 г. затраты на биодизельное топливо возросли на 87% при получении его из сои и на 49% для рапсового масла. В среднем производственные затраты оцениваются в 1,3 долл. за литр биодизеля. Считается, что применение передовых технологий получения жидких биотоплив может дать положительный эффект по сокращению издержек производства, в результате чего стоимость биотоплива может сократиться до 0,6-1,1 долл./л к 2020 г., что позволит передовым технологиям получения биодизеля конкурировать с ископаемым топливом.³⁴

В настоящее время разработана технология для получения биодизеля второго поколения. Высококачественное дизельное топливо (и даже топливо для реактивных двигателей) могут быть получены путем гидрокрекинга

³⁴IRENA Report, Road Transportation: the Cost of Renewable Solutions, 2013.

растительных масел и животных жиров. Биодизельное топливо второго поколения может быть получено сегодня из любого типа биомассы, включая древесные и другие материалы на основе целлюлозы, такие как солома, отходы кукурузы и древесные остатки от лесохозяйственных операций и целлюлозно-бумажного производства. Эти исходные материалы можно выращивать на бросовых (маргинальных) землях, которые не используются для производства продуктов питания, а также путем выращивания быстрорастущих лесов. Другие потенциальные исходные материалы включают навоз и муниципальные твердые отходы.

Биоэтанол. Одной из разновидностей жидких биотоплив является биоэтанол, получаемый биологической конверсии культур с высоким содержанием сахаров или крахмалов, например, из сахарного тростника или свеклы. В процессе нагревания измельченных сахаросодержащих продуктов экстрагируется сахароза, которая затем метаболизируется в дрожжевые клетки, ферментирующиеся в гексозу, т.е. простые углеводы (моносахариды - глюкоза, фруктозу и др.).

Этанол - спирт, который является жидким при температуре окружающей среды и давлении, и применяется во многих странах мира в качестве топлива. Его можно использовать в смесях с бензином в существующих транспортных средствах с небольшой модификацией двигателя внутреннего сгорания. Это чистое высокооктановое топливо, хотя его энергосодержание составляет всего около 65% от бензина. Сжигание этанола приводит к снижению выбросов твердых частиц, углеводородов и окиси углерода.

В качестве сырья для получения этанола наиболее часто используются кукуруза (США), пшеница (Европа) и сахарный тростник (Бразилия). В табл. 3 приведены основные сведения об эффективности получения биоэтанола из ряда культур массового производства.

Таблица 3. Основные источники сырья для получения биоэтанола

| <i>Показатели процесса</i> | <i>Кукуруза</i> | <i>Пшеница</i> | <i>Сахарный тростник</i> |
|---|-----------------|----------------|--------------------------|
| Выход этанола, л/т | 400 - 425 | 390 - 470 | 76 - 96 |
| Цены на сырье (2012 г.), долл./т | 235 - 310 | 249 - 361 | 35 - 45 |
| Стоимость сырья в биоэтаноле, долл./л бензинового эквивалента | 0,83 - 1,18 | 0,85 - 1,39 | 0,55 - 0,89 |

Источник: IRENA Report, Road Transportation: the Cost of Renewable Solutions, 2013.

В последние годы определенный интерес возник к процессам получения "вторичного" этанола. Эти процессы позволяют использовать материалы, остающиеся от традиционного производства этанола, в виде большого количества волокнистых остатков из исходного сырья (шелуха семян, стебли т.п.). Использование большего количества органического материала для

производства этанола позволит расширить сырьевую базу для получения этанола и снизить конкуренцию с пищевыми продуктами. Между тем, несмотря на множество потенциальных исходных материалов и улучшений в процессе переработки отходов, до сих пор не было создано эффективных процессов получения вторичного этанола в промышленных масштабах.

2.4. Электричество

Электропривод в течение относительно длительного времени широко применяется для массовых перевозок пассажиров и грузов по рельсам (железнодорожный транспорт, городской массовый транзит – метрополитен, трамваи, троллейбусы). Однако, интерес к использованию электроэнергии в индивидуальном транспорте, способном конкурировать с легковым автомобилем на ДВС, возник лишь пару десятилетий тому назад. 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 лет электромобиль сможет стать вполне конкурентоспособным с автомобилем на ДВС. *Подробнее см. ниже.*

Не менее важным является степень экологичности электромобиля, особенно при использовании в городских условиях, где выбросы парниковых газов от применения электромобиля в городе снижаются до нуля.³⁵

2.5. Водород

Водород (H₂) – как альтернативное моторное топливо, часто упоминается в качестве источника энергии будущего. Водород составляет 75% вселенной. В природе он находится в основном в связанном состоянии. В результате горения водорода получается только вода.

По энергетическим характеристикам 1 кг водорода эквивалентен по энергии 2,8 кг бензина, но в единице объема водорода содержится только 30% от энергии бензина. Таким образом, водород имеет преимущество для

³⁵ На самом деле электромобиль нельзя считать абсолютно чистой технологией, т.к. определенные выбросы загрязнителей имеют место при генерировании электроэнергии для привода электромобилей от источника топлива для электростанций до зарядного устройства электромобиля (*топливный цикл*), но концентрация этих выбросов и связанные с ними ущербы оказываются значительно более ослабленными в силу степени лучшего рассеивания выбросов в объектах электроэнергетики и более низкой чувствительности загородных территорий к загрязнителям, где прокладываются коммуникации по снабжению потребителей электроэнергией, чем в городских территориях.

применения там, где вес имеет большее значение, чем габариты (размеры) емкости, в которой он хранится.

Запасы водорода в окружающей среде значительны. В связанном виде он находится в воде (H_2O), углеводородах (таких как метан, CH_4 , сырая нефть) и других органических веществах. Одна из проблем использования водорода в качестве топлива заключается в возможности эффективно извлекать его из этих соединений. Существует несколько способов получения водорода в промышленных масштабах: *паровой риформинг метана, путем газификации угля, электролизом воды, термохимическим разложением воды* и т.п.

Водород преобразуется в электроэнергию в электрохимических генераторах (*топливных элементах - ТЭ*). ТЭ более эффективны, чем обычные ДВС, и не производят выбросы выхлопных газов - они только выделяют водяной пар. Наиболее распространенным типом топливного элемента для применения в транспортных средствах является топливный элемент с полимерным электролитом (РЕМ). *Подробнее о производстве водорода и генерировании электроэнергии в ТЭ см. ниже.*

Электроэнергия поступает на электродвигатели, которые приводят в движение автомобиль. В этом отношении водородный автомобиль с ТЭ, как и электромобиль, используют в качестве конечного энергоносителя электроэнергию. Однако, в электромобиле эта электроэнергия вырабатывается за пределами автомобиля и хранится в электроаккумуляторах, а в автомобиле с ТЭ она генерируется непосредственно на борту автомобиля из водорода, который производится за его пределами по одному из известных методов и хранится внутри автомобиля в специальных емкостях в сжатом или сжиженном виде. Также как и электромобиль автомобиль с ТЭ в городских условиях является практически чистым топливом, не имеющим выбросов в атмосферу.

В табл. 4 приведены основные сравнительные характеристики наиболее распространенных моторных топлив, источники их получения и энергосодержание в сравнении с традиционными нефтепродуктами (бензином)..

3. Основные показатели для расчета эффективности различных технологий легкового автотранспорта

3.1. Метод оценки экономической эффективности инновационных технологий

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 [5].

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 расширены за счет возросшего интереса к вопросам защиты окружающей среды. 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 к 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, работы [6 - 8]).

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

Таблица 4. Усредненные сравнительные характеристики основных видов моторных топлив

| | <i>Бензин</i> | <i>Дизтопливо</i> | <i>Биодизель</i> | <i>Пропан-бутан</i> | <i>Природный газ (сухой)</i> | <i>Природный газ (жидкий)</i> | <i>Этанол (E100)</i> | <i>Метанол</i> | <i>Водород</i> | <i>Электроэнергия</i> |
|---|--|--------------------------------------|--|--|---|---|--|---------------------------------|---|--|
| Химическая структура | от C ₄ до C ₁₅ , этанол до+10% | от C ₈ до C ₂₅ | от C ₁₂ до C ₂₂ , жирные углеводороды | C ₃ H ₈ и C ₄ H ₁₀ | CH ₄ и C ₂ H ₆ , инертные газы | CH ₄ и C ₂ H ₆ , инертные газы | CH ₃ CH ₂ OH | CH ₃ OH | H ₂ | - |
| Источник получения | Сырая нефть | Сырая нефть | Соя, рапс, жировые отходы пищевого производства, животные жиры | Побочные продукты нефте- и газопереработки | Месторождения природного газа, биогаз | Месторождения природного газа, биогаз | Кукуруза, пшеница, отходы с.х. (целлюлоза) | Природный газ, уголь, древесина | Природный газ, метанол, электролиз воды | Уголь, ядерная энергия, природный газ, гидроэнергия, ВИЭ |
| Удельные расходы (относительно бензина) | 97%...100% | 1 л дизтоплива = 1,12 л бензина | 1 л биодизеля ≈ 1 л бензина | 1 л пропана = 0,72 л бензина | 1 л газа = 1,05 л бензина | 1 кг СПГ = 1,36 л бензина | 1 л E100 = 0,66 л бензина | 1 л метанола = 49% л бензина | 1 кг H ₂ = 3,71 л бензина | 8,95кВтч = 1 л бензина |
| Низшая теплота сгорания | 7697 ккал/л | 8584 ккал/л | 7810 ккал/л | 5570 ккал/л | 8100 ккал/л | 11810 ккал/л | 5050 ккал/л | 3775 ккал/л | 3465 ккал/л | 860 ккал/кВтч |
| Физическое состояние | жидкость | жидкость | жидкость | жидкость | сжатый газ | криогенная жидкость | жидкость | жидкость | газ под давлением или жидкость | электроэнергия |

Источник: US DOE. *Energy Efficiency and Renewable Energy. Alternative Fuel Data Center* (www.afdc.energy.gov); расчеты автора.

(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 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 работах [9 - 12].

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.

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):

$$Z_{ЭН} = \sum_t C_{ЭНt} \cdot B_{ЭНt},$$

где $C_{ЭНt}$ – цена энергоносителя в период t ; $B_{ЭНt}$ – 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:

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

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

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.

3.2. Оценка энергозатрат и выбросов автотранспорта в окружающую среду (по модели GREET)

Для расчета энергозатрат и выбросов вредных веществ в атмосферу была использована модель оценки эффективности различных технологий автотранспорта GREET (*TheGreenhousegases, RegulatedEmissions, andEnergyuseinTransportationModel*), разработанная ArgonneNationalLaboratory (США).³⁶GREET представляет из себя многомерную модель электронных таблиц в системе MicrosoftExcel. Для каждого транспортного средства и топливной системы модель позволяет рассчитывать следующее показатели для более чем 100 различных вариантов 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 средств для эксплуатации оборудования.
- Выбросы парниковых газов (GHG), эквивалентных CO₂, в основном углекислый газ (CO₂), метан (CH₄) и закись азота (N₂O).
- Выбросы по семи типам 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,*
 - легкие грузовые автомобили (вес брутто <2500 кг),*
 - легкие грузовики (вес брутто <3700 кг).*

³⁶Рабочая версия модели находится в свободном доступе на сайте ArgonneNationalLaboratory (<https://greet.es.anl.gov/>).

- Различные типы топливных систем:
ДВС - обычные двигатели с искровым зажиганием, зажигание с искровым зажиганием, прямое впрыскивание, двигатели с принудительным зажиганием, двигатели с прямым впрыском,
Электромобили - гибридные электрические транспортные средства, электромобили с батарейным питанием,
Водородные автомобили - транспортные средства с топливными элементами и т.п.).

В модели GREET³⁷ выделяются три стадии формирования затрат:
топливный цикл – получение моторного топлива, электроэнергии и водорода и их доставка до АЗС («от скважины до АЗС» – Well-to-Pump),
эксплуатация автомобиля – использование топлива непосредственно в автомобиле (вместе с Well-to-Pump дает Well-to-Weel),
производство автомобиля – затраты энергоресурсов и сопутствующие выбросы в процессе изготовления автомобиля.

Такой комплексный подход позволяет обоснованно подойти к экономической оценке ущербов в результате применения различных технологий автотранспорта. В работе параметры модели GREET были настроены на усредненные параметры показателей развития мировой энергетики в долгосрочной перспективе, рассмотренные в ряде прогнозных исследований по развитию мировой энергетики (BP, ExxonMobil, IEA и др.).

В табл. 5 представлен один из вариантов расчета полных расходов энергии и выбросов в окружающую среду по рассмотренным технологиям. Как можно видеть из табл. 5, традиционные технологии требуют от 4,7 до 11 кг н.э./100 км. При этом непосредственно в автомобиле расходуется около 2/3 этих энергозатрат, остальные распределены примерно поровну между расходами на получение моторных видов топлива и изготовление автомобиля, включая материалы. Суммарные выбросы CO₂ достигают 20-25 кг/100 км, а остальных загрязнителей – от 160 г (суммарно по весу без учета токсичности выбросов) для дизельного топлива до 225-230 г для бензина и природного газа.

Водородные технологии (кроме электролиза) при централизованном производстве энергоносителя имеют суммарные энергозатраты на 20-40% ниже, чем при традиционных моторных видах топлива. Выбросы CO₂ зависят от способа производства водорода:

- при использовании тепла от ВГТР они составляют примерно всего одну треть от эмиссии для бензинового двигателя;
- при газификации угля оказываются практически равнозначными с традиционными двигателями;
- при электролизе на базе электроэнергии, получаемой от энергосистемы, на 55-60% больше.

³⁷The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation (GREET) Model, Transportation Technology R&D Center (<http://www.transportation.anl.gov/software/GREET/>)

Выбросы остальных загрязнителей для водородных технологий находятся в пределах 50-60% выбросов при традиционных моторных видах топлива.

Таблица 5. Пример расчетных значений полного расхода энергии и выбросов загрязнителей по рассматриваемым технологиям и моторным топливам автотранспорта в 2015 году

| Энергоноситель | Бензин | Дизтопливо | Электро-энергия | Водород (централизованное производство) | | | | | Водород (децентрализованное про-во) | |
|--|-----------------------------|------------|-----------------|---|------------------|------|---------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| | | | | ПКМ | Газификация угля | ВТГР | Электролиз (от э/системы) | Электролиз (ВЭС, СЭС) | ПКМ | Электролиз (от э/системы) |
| Технология | ДВС | | Электро-мобиль | | | | | | | |
| | Газообразный водород | | | | | | | | | |
| Всего энергия, кг н.э./100 км, в т.ч.: | 7,85 | 6,57 | 5,53 | 6,04 | 6,16 | 4,65 | 10,34 | 5,42 | 5,61 | 10,93 |
| - Топливный цикл | 17% | 14% | 49% | 35% | 36% | 16% | 66% | 28% | 30% | 64% |
| - Эксплуатация авто | 66% | 66% | 27% | 37% | 36% | 48% | 19% | 41% | 40% | 21% |
| - Производство авто | 17% | 20% | 25% | 28% | 27% | 36% | 14% | 31% | 30% | 15% |
| | Выбросы, г/100 км | | | | | | | | | |
| CO ₂ * | 23,9 | 21,5 | 18,7 | 17,3 | 25,0 | 8,0 | 39,4 | 7,6 | 16,2 | 37,1 |
| VOC | 33,2 | 23,3 | 17,6 | 17,6 | 17,8 | 16,6 | 19,2 | 16,6 | 17,4 | 19,0 |
| CO | 135,3 | 84,0 | 31,6 | 30,1 | 28,2 | 27,4 | 35,8 | 27,2 | 29,2 | 35,1 |
| NO _x | 22,8 | 22,2 | 21,9 | 21,3 | 12,7 | 11,8 | 45,2 | 11,0 | 14,4 | 42,0 |
| PM _{2,5-10} | 12,2 | 11,7 | 27,1 | 13,9 | 37,8 | 13,0 | 52,5 | 12,5 | 13,5 | 50,0 |
| PM _{<2,5} | 5,1 | 4,9 | 8,3 | 5,9 | 10,9 | 4,7 | 15,2 | 4,6 | 5,7 | 14,6 |
| SO _x | 16,2 | 15,1 | 50,5 | 30,4 | 29,9 | 28,5 | 99,1 | 27,6 | 28,6 | 94,5 |
| | Сжиженный водород | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|---|---|------|------|------|-------|------|---|---|
| <i>Всего энергия, кг н.э./100 км</i> | - | - | - | 7,77 | 8,22 | 6,70 | 16,17 | 7,48 | - | - |
| -Топливный цикл | - | - | - | 50% | 52% | 42% | 76% | 48% | - | - |
| - Эксплуатация авто | - | - | - | 29% | 27% | 33% | 14% | 30% | - | - |
| - Производство авто | - | - | - | 22% | 20% | 25% | 10% | 22% | - | - |
| <i>Выбросы, г/100 км</i> | | | | | | | | | | |
| CO2* | - | - | - | 23,2 | 32,0 | 14,9 | 54,9 | 14,5 | - | - |
| VOC | - | - | - | 18,1 | 18,4 | 17,2 | 20,5 | 17,1 | - | - |
| CO | - | - | - | 31,4 | 30,1 | 29,3 | 40,0 | 29,0 | - | - |
| NOx | - | - | - | 27,9 | 19,6 | 18,7 | 61,7 | 18,0 | - | - |
| PM2,5-10 | - | - | - | 22,7 | 46,6 | 21,7 | 72,4 | 21,2 | - | - |
| PM<2,5 | - | - | - | 8,2 | 13,3 | 7,1 | 20,5 | 6,9 | - | - |
| SOx | - | - | - | 45,9 | 45,5 | 44,1 | 134,7 | 43,2 | - | - |

Примечание: ПКМ – прямая конверсия метана; ВТГР – высокотемпературный газоохлаждаемый реактор.

Источник: 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.

В случае использования электролиза для получения водорода показатели сильно зависят от источника электроснабжения: при снабжении от энергосистемы энергозатраты оказываются в 1,4-1,5 раза выше, чем при бензиновом топливе, но при использовании возобновляемых источников энергии (СЭС или ВЭС) они не превышают 70%. Что касается остальных вредных выбросов, то они имеют ту же тенденцию.

Выбросы CO₂ при электроснабжении от энергосистемы возрастают на 60% по сравнению с бензиновым двигателем, но при производстве электроэнергии на возобновляемых источниках они снижаются до одной трети. Примерно такие же соотношения имеют место по другим загрязнителям.

Эти величины показывают важность учета экологических затрат при сравнении различных видов моторных топлив и технологий автотранспорта.

Модель GREET позволяет сравнить также различные варианты моторных топлив и транспортных средств между собой. Они дают возможность оценить полную нагрузку отдельных технологий на окружающую среду и корректно подойти к расчету *социальной стоимости* сравниваемых технологий.

3.3. Оценка перспективных цен на энергоносители и других факторов, учитываемых в расчетах конкурентоспособности

Далее в этом разделе рассмотрены основные допущения, принятые при расчете перспективных показателей экономичности отдельных технологий автотранспорта. Расчеты выполнены для нескольких временных интервалов: 2015 г. (базовый), 2025, 2030 и 2035 г.

Сырая нефть и нефтепродукты. За основу расчетов цены традиционных моторных топлив принят упрощенный прием выражения их через движение цен сырой нефти. В действительности цены бензина и дизтоплива в отдельных странах могут различаться в разы в связи с различной системой налогообложения моторных топлив. Поэтому здесь мы ограничимся лишь некоторыми обобщенными наблюдениями.

Связь между ценами традиционных нефтепродуктов и сырой нефти в развитых странах хорошо прослеживается при сопоставлении рис. 1 и 2.

Как следует из рис. 1 и 2, устойчивым коэффициентом соотношения цен нефтепродукта и сырой нефти в последние годы являются: для бензина – 2,3 и для дизтоплива – 2,75 (рассчитано по данным *IEA. MonthlyEnergyPricesStatistics, OECD/IEA, 2015*). Эти коэффициенты приняты в расчетах постоянными на перспективу до 2030-2035 гг.

В качестве прогнозов цены сырой нефти приняты две тенденции ее роста: *минимальная* - от 55 долл./барр. в 2015 г. до 90 долл. в 2035 г., и *максимальная* – до 125 долл. к 2035 г. Обе тенденции хорошо

корреспондируют с доминирующими в настоящее время мнениями относительно движения цен на сырую нефть.

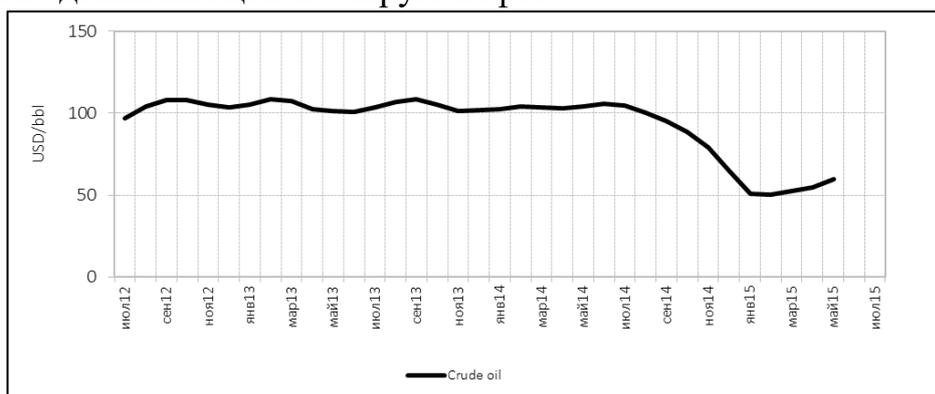


Рис. 1. Цена сырой нефти в странах МЭА

(Источник: <http://www.iea.org/statistics/relatedsurveys/monthlyenergyprices/>)

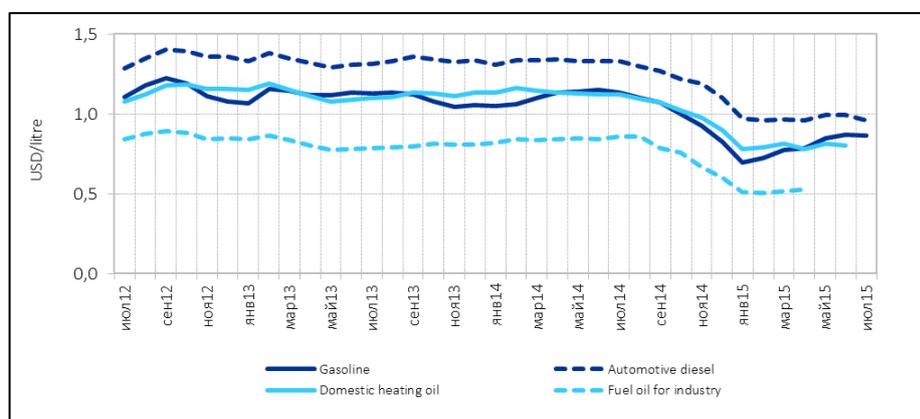


Рис. 2. Цены нефтепродуктов в странах МЭА

(Источник: <http://www.iea.org/statistics/relatedsurveys/monthlyenergyprices/>)

Природный газ. Поскольку проблема прогнозирования цены природного газа разработана пока слабо, то в основу оценок были также положены цены сырой нефти. Анализ данных по ценам нефти и газа в развитых странах показывает, что соотношение средней цены в долл./1000 м³ к цене сырой нефти в барр. сегодня составляет около 4,5 (рассчитано по данным раздела цен в *IEA/OECD Energy Prices and Taxes, 2014 Edition*).

Стоимость использования природного газа непосредственно в качестве моторного топлива оценено по цене дизельного топлива (в пересчете по теплотворной способности). Это означает, что цена природного газа для использования в автотранспорте увеличивается в 2-3 раза по сравнению с ценами для других потребителей.

Синтетическое моторное топливо по технологии GTL.

Предполагается, что топливо GTL по своим качественным характеристикам близко к дизельному топливу и должно оцениваться на рынке по ценам близким или равным цене традиционных моторных топлив. Между тем, стоимость получения GTL на 15-20% оказывается ниже цены традиционных

бензина и дизтоплива. Для сравнения маржа в случае традиционных топлив достигает 45-55%.³⁸

Электроэнергия. Электроэнергия в рассматриваемом контексте используется для производства водорода и для зарядки аккумуляторов электромобилей. В расчетах предполагается, что производство водорода электролизом независимо от получения централизованным путем или в децентрализованных установках оплачивается по промышленному тарифу. Заправка аккумуляторов электромобилей как легкового автотранспорта рассчитывается по бытовому тарифу с учетом возможности использовать понижающий коэффициент при зарядке в ночное время. Соотношении бытового и промышленного тарифов на электроэнергию в среднем по развитым странам за последние пять лет составляет 1,41 [рассчитано по *IEA/OECD Energy Prices and Taxes, Part III, 2014*].

Прогнозы цен электроэнергии для промышленных потребителей представлены в двух вариантах:

- *максимальный рост* – 3% в год для всего периода прогнозирования,
- *минимальный рост* – 3%/год до 2020 г., со стабилизацией в период 2020-2025 гг. и снижении на 1%/год в период 2025-2035 гг.³⁹

В табл. 6 сгруппированы основные сценарные условия по стоимости энергоносителей, принятые в расчетах эффективности альтернативных моторных топлив и технологий.

Таблица 6. Сценарные исходные условия по оценке стоимости энергоносителей (все показатели в долл. (2015))

| | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 |
|--|------|------|------|------|------|
| Сырая нефть, долл./барр. | | | | | |
| минимум | 55 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| максимум | 55 | 75 | 85 | 100 | 125 |
| Бензин | | | | | |
| Среднее соотношение с ценой нефти, л бензина/л сырой нефти | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| минимум | 0,80 | 0,87 | 1,01 | 1,16 | 1,30 |
| максимум | 0,80 | 1,08 | 1,23 | 1,45 | 1,81 |
| Дизельное топливо | | | | | |
| Среднее соотношение с ценой нефти, л | 2,75 | 2,75 | 2,75 | 2,75 | 2,75 |

³⁸Синяк Ю.В., Колпаков А.Ю. Эффективность производства синтетических моторных топлив из природного газа, Проблемы прогнозирования, № 1, 2012.

³⁹ Такая траектория изменения цены электроэнергии объясняется ожидаемыми изменениями в структуре генерирования электроэнергии в пользу сильно дешевлеющих возобновляемых источников энергии и развития децентрализованного производства электроэнергии (распределочной энергетики).

| | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| дизтоплива/л сырой нефти | | | | | |
| минимум | 0,95 | 1,04 | 1,21 | 1,38 | 1,56 |
| максимум | 0,95 | 1,30 | 1,47 | 1,73 | 2,16 |
| Природный газ, долл./1000 м3 | | | | | |
| Среднее соотношение цены нефти и газа, 1000 м3 газа/барр. нефти/ | 4,5 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| минимум | 247,5 | 240 | 280 | 320 | 360 |
| максимум | 247,5 | 300 | 340 | 400 | 500 |
| Электроэнергия, ц/кВтч (промышленность) | | | | | |
| Средний темп роста, %/год | | | | | |
| минимум | - | 3% | 0% | -1% | -1% |
| максимум | - | 3% | 3% | 3% | 3% |
| Стоимость, ц/кВтч | | | | | |
| минимум | 12,50 | 14,49 | 14,49 | 13,78 | 13,11 |
| максимум | 12,50 | 14,49 | 16,80 | 19,47 | 22,58 |
| Электроэнергия, ц/кВтч (население) | | | | | |
| Среднее соотношение цен для населения и промышленности | 1,41 | 1,41 | 1,41 | 1,41 | 1,41 |
| минимум | 17,63 | 20,43 | 20,43 | 19,43 | 18,48 |
| максимум | 17,63 | 20,43 | 23,69 | 27,46 | 31,83 |

3.4. 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.⁴⁰

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

⁴⁰ Как показывают выводы этого исследования, фактор ущербов заслуживает самого пристального изучения и учета состава реципиентов при обосновании направлений инновационной активности.

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 ущербе принадлежит составляющей, связанной с влиянием на здоровье людей. Эта компонента достигает 75-80% суммарного экологического ущерба от выбросов автотранспорта.⁴¹ В приводимых ниже расчетах значения ущерба для здоровья людей приняты по данным, содержащим наиболее подробные оценки⁴² 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 было использован следующий подход:

- ущербы на сельской территории имеют коэффициент воздействия, равный 1,
- на территории с низкой 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

⁴¹Jensen, 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.

⁴²McCubbin 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.

загрязнителей приняты значения, приведенные в работе Delucchi⁴³ 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. 7 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 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. Экономическая оценка ущербов для здоровья людей в результате воздействия основных загрязнителей автотранспорта, долл./кгвыбросов *

| Виды загрязнителей | Варианты ущербов 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.),

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

⁴³Delucchi 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.

оценках других загрязнителей, нет единого мнения.⁴⁴ ([26]). По разным источникам, оценки ущербов от климатических изменений варьируются от 5 до почти 4000 долл./т CO₂ [27]. На основе анализа большого количества опубликованных материалов рекомендуется использовать три варианта оценки ущербов от выбросов CO₂: *минимальную, среднюю и максимальную* оценку (табл. 8).⁴⁵ Эти диапазоны приняты нами ниже при расчете ущербов от изменения климата в связи с увеличением концентрации в атмосфере парниковых газов.⁴⁶

Таблица 8. 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.

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

3.5. Дополнительные параметры, учитываемые при сопоставлении альтернативных технологий

Все расчеты эффективности эксплуатации сравниваемых традиционных и альтернативных вариантов выполнены при следующих допущениях:

⁴⁴ См., например, обзор работ по этому вопросу в ToddLitman (2012). *Climate Change Emission Valuation for Transportation Economic Analysis*. Victoria Transport Policy Institute, http://www.vtpi.org/ghg_valuation.pdf.

⁴⁵ Далее в этой статье показаны только два крайних варианта результатов расчета – нижняя оценка (1) и верхняя оценка (3).

⁴⁶ 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.

*Годовой пробег*⁴⁷ – 20 тыс. км, в том числе в городском цикле – 70%.

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

Срок службы авто – 15 лет.

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

Эксплуатационные издержки: электромобиль – 0,5% от стоимости авто в год, *остальные технологии* – 1% (принято экспертно).

Норма прибыли на капитал – 10% в год.

Для проведения расчетов конкурентоспособности при различных комбинациях исходных данных автором совместно с Петровым В.Ю., была разработана развернутая модель расчета стоимости пробега автомобиля, разработанная в форматах MSExcel и опирающаяся на результаты технических и экологических расчетов, выполненных по модели GREET.

4. Перспективы совершенствования легковых автомобилей с различными типами двигателя

4.1. Двигатель внутреннего сгорания (ДВС)

4.1.1. Пути совершенствования ДВС

Автомобиль с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) был впервые сконструирован в 80-х годах XIX века. С тех пор ДВС непрерывно совершенствовался, хотя его эффективность как тепловой машины остается на относительно низком уровне: в полезную энергию в ДВС на бензине преобразуется не более 15-20% подведенной энергии. Несколько более высокий КПД имеет дизельный двигатель, который при соответствующем исполнении и в стационарных условиях может достигать КПД 35-40%. Реальная эффективность ДВС в транспортных устройствах значительно ниже в связи с необходимостью использовать двигатель в течение значительного времени в неоптимальных режимах (пуск, разгон, торможение, движение в пробках и т.п.).

Расходы топлива в автомобилях рассматриваемого типа сильно зависят от размеров автомобиля. В табл. 9 показаны некоторые параметры типовых легковых автомобилей различных классов,⁴⁸ сгруппированных в три крупные категории: малые, компактные и большие автомобили. Как следует из таблицы, расходы топлива и выбросы в окружающую среду во многом определяются размерами автомобиля.

Таблица 9. Укрупненные характеристики автомобилей с ДВС

⁴⁷Как показали расчеты, эффективность альтернативных технологий сильно зависит от величины годового пробега автомобиля: чем он меньше, тем менее конкурентоспособными являются технологии с высокой стоимостью инвестиций.

⁴⁸ В основу положена классификация Английского общества производителей и продавцов транспортных средств (SMMT – The Society of Motor Manufacturers and Traders).

| | <i>Малые авто</i> | <i>Компактные авто</i> | <i>Крупные авто</i> |
|---|-------------------|------------------------|---------------------|
| Длина, м | 3-3,7 | 4,2-4,7 | 4,5-4,8 |
| Объем двигателя, л | 1-1,4 | 1,3-2,8 | 2,0-3,5 |
| Макс. мощность, л.с. | 84 | 144 | 212 |
| Снаряженный вес, кг | 1037 | 1407 | 1844 |
| Средний расход топлива, л/100 км | 4,5 | 5,0 | 5,25 |
| Средний выброс CO ₂ , гCO ₂ /км | 115 | 120 | 125 |

Источники: Influence on the Low Carbon Car Market from 2020-2030. Final Report. Element Energy, July 2011 (<http://www.smmmt.co.uk/wp-content/uploads/sites/2/SMMT-2013-Motor-Industry-Facts-guide.pdf?9b6f83>); <http://www.fueleconomy.gov>; ICCT (The International Council on Clean Transportation), European Vehicle Market Statistics, Pocketbook 2017/2018.

Несмотря на то, что автомобиль с ДВС практически достиг предельных параметров по энергоэффективности, ведущие производители продолжают совершенствовать автомобили. Подробный анализ изменений в автотранспорте под влиянием инновационных решений в проектировании, конструировании и изготовлении транспортных средств, регулировании транспортных перевозок за период с 1975 г. приведен в *EPA, Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 Through 2013, Dec. 2013*. За последние 40 лет средний вес легкового автомобиля сократился на 12%, мощность двигателя возросла почти в 1,5 раза, время разгона до 100 км уменьшилось на одну треть, расход топлива достиг примерно 6-6,5 л/100 км по сравнению с 18 л в 1975 г., а выбросы CO₂ снизились в 2 раза.

В настоящее время цена на новые автомобили компакт класса в Европе составляют около 18-30 тыс. долл. (<http://www.autoprize.eu>). В табл. 10 приведены некоторые характеристики массовых автомобилей с ДВС.

Таблица 10. Усредненные характеристики массовых автомобилей с ДВС на европейском рынке (2017)

| <i>Марки автомобилей*</i> | <i>Цена, вкл. налоги, тыс. евро</i> | <i>Мощность, кВт</i> | <i>Полный вес, кг</i> | <i>Удельный расход топлива, л/100 км</i> | <i>Выбросы CO₂, г/км</i> |
|---------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------|--|-------------------------------------|
| VW | 29,2 | 93 | 1933 | 4,8 | 119 |
| Renault | 22,4 | 76 | 1792 | 4,4 | 106 |
| Ford | 24,8 | 93 | 1916 | 5,0 | 121 |
| Peugeot | 22,7 | 79 | 1792 | 4,4 | 106 |
| Mercedes-Benz | 45,6 | 131 | 1916 | 5,0 | 121 |
| Audi | 41,3 | 132 | 1729 | 4,1 | 101 |
| BMW | 45,4 | 140 | 2148 | 4,9 | 122 |

| | | | | | |
|------------------|------|-----|------|-----|-----|
| Fiat | 17,7 | 68 | 1607 | 5,0 | 119 |
| Opel | 21,6 | 84 | 1838 | 5,1 | 121 |
| Skoda | 22,5 | 88 | 1782 | 4,6 | 112 |
| Toyota | 22,9 | 74 | 1714 | 4,4 | 104 |
| Hyundai | 22,3 | 81 | 1823 | 5,2 | 126 |
| Volvo | 43,1 | 130 | 2312 | 4,7 | 122 |
| Средние значения | 25 | 85 | 1750 | 5,0 | 120 |

* Перечень автомобилей приведен в порядке распространения на европейском рынке.
 Источник: ICSTPocketbook 2017.

В последние годы в Европе серьезно проявляется тенденция на сокращение применения двигателей внутреннего сгорания. Так, в 2017 г. парламент Франции проголосовал за запрет на добычу природных топлива в стране и на всех ее территориях к 2040 году. Французское правительство заявило, что планирует запретить продажу всех бензиновых и дизельных автомобилей к 2040 г. как ответ на достижение целей климатического соглашения в Париже (2015 г.).⁴⁹ Великобритания также заявила, что она запретит продажу новых бензиновых и дизельных автомобилей, начиная с 2040 г. Предполагается, что к 2050 г. весь автопарк легковых автомобилей в этой стране будет иметь нулевые выбросы углерода⁵⁰. Аналогичную позицию занимает и Германия. В октябре 2017 г. Бундесрат Германии принял резолюцию о запрещении автомобилей с ДВС к 2030 г.⁵¹ В Норвегии запрет на традиционные автомобили наступит гораздо быстрее. К 2025 г. все новые легковые автомобили и фургоны, эксплуатируемые в этой стране должны иметь нулевыми выбросами.⁵² Страна уже проделала значительный путь к отказу от ДВС: в 2016 г. около 40% всех проданных в Норвегии автомобилей имели электрические или гибридные двигатели. В ближайшем будущем в Дании, Ирландии, Нидерландах, Испании и Португалии начнется интенсивный переход на электромобили.

Это хорошая новость для автопроизводителей. Шведский автопроизводитель Volvo, учитывая позицию многих европейских стран, летом 2018 г. выступил с заявлением о том, что к 2019 г. он прекратит проектирование автомобилей с ДВС. Hyundai Motor была пионером водородной индустрии на базе топливного элемента в автомобилях. Эта инициатива корейцев, начатая еще в 1990-х годах, когда стоимость изготовления одного ТЭ была настолько высока, что розничная цена каждого транспортного средства на водороде превышала 1 млн. долл. Но отрицательное отношение к водороду тогдашнего министра энергетики США Стивена Чу переориентировало американский рынок на электромобили. Это

⁴⁹<http://www.bbc.co.uk/news/world-europe-40518293>

⁵⁰<http://www.bbc.co.uk/news/uk-40723581>

⁵¹<https://www.forbes.com/sites/frankahrens/2017/12/22/2017-the-year-europe-got-serious-about-killing-the-internal-combustion-engine/#1323223b2ff0>

⁵²<http://fortune.com/2016/06/04/norway-banning-gas-cars-2025/>

заставило Hyundai переключился на Европу, где появился интерес к альтернативным топливам и где ЕС уже принял водородную дорожную карту для своих стран-членов. К настоящему времени стоимость автомобиля с ТЭ сократилась до нескольких десятков тыс. долл. В настоящее время в Европе, помимо станций зарядки электромобилей, строятся водородные заправочные станции.

Аналогичная стратегия наблюдается и в развивающихся странах. Так, предполагается, что к 2030 г. продажи новых легковых автомобилей в Индии будут ограничены только электромобилями.⁵³ В Китае поставлена задача достигнуть к 2025 г. 20% электромобилей в численности парка легковых автомобилей.⁵⁴

В России пока парк электромобилей незначителен. По мнению специалистов, в России электромобили будут внедряться медленнее, чем в других странах, поскольку существует диспропорция между плотностью дорог в местах высокой плотностью населения и во всей остальной территории страны. Пока в России не решена более простая задача обеспечения транспортной доступности населения традиционными транспортными средствами.

Возможности снижения удельных расходов топлива в ДВС. Поскольку дальнейший рост показателей эффективности двигателя внутреннего сгорания практически исчерпаны, то снижение расходов топлива возможно 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%.⁵⁵ В обозримой перспективе существуют возможности дальнейшего снижения веса автомобиля еще на 28-30% к 2030.⁵⁶

Одновременно со снижением веса наблюдается систематическое увеличение мощности двигателя, что в свою очередь приводит к увеличению расхода топлива. В среднем по автомобилям компакт-класса в 2010 г. отношение мощности к весу автомобиля составляло около 0,102 кВт/кг.⁵⁷ В период 1995-2010 гг. этот показатель возрастал с темпом 0,5-2,5% в год. Принимая 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

⁵³<https://electrek.co/2016/03/28/india-electric-cars-2030/>

⁵⁴<http://www.bbc.co.uk/news/business-41218243>

⁵⁵Gillespie, Th. Fundamentals of Vehicle Dynamic, SAE International, 1999.

⁵⁶MIT. In the Road in 2035, 2008; Lotus Engineering Inc. An Assessment of Mass Reduction Opportunities, 2010.

⁵⁷ Оценено по данным www.automobile-catalog.com

останется на стабильном уровне. В дальнейших расчетах принята 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%.⁵⁸ 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.⁵⁹ Влияние этих факторов отражено в прогнозных оценках расходов топлива типовым автомобилем компакт-класса, приведенных ниже в табл. 11.

Недавно появилось сообщения, что компания MWIWaveIgnitionAG приступила к исследованиям по продлению срока службы традиционных ДВС и повышению их эффективности.⁶⁰ Разработанная альтернативная система зажигания поможет снизить расход топлива на 30% и уменьшить вредные выбросы на 80%. Технология использует вместо искрового разряда импульсный микроволновой. Ее можно адаптировать для любых современных двигателей, без необходимости внесения изменений в конструкцию. MWI уже начал переговоры с корейскими и китайским автопроизводителями. Одним из потенциальных партнеров выступает Hyundai. Кроме того, заключено соглашение с компанией FachAutoTech, принимающей участие в монокубке Porsche Mobil 1 Supercup. Предполагается, что систему зажигания на основе микроволновых импульсов будут использовать на гоночных машинах со следующего сезона.

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.

Структура цены типового автомобиля с ДВС. Стоимость автомобиля играет заметную роль при оценке эффективности альтернативных топлив и технологий. Здесь имеет смысл выделить три основные компоненты стоимости: двигатель, прочих устройств и стоимость шасси/кузова.

На основе анализа различных исследований по стоимости и совершенствованию ДВС были укрупненно оценены ожидаемые компоненты стоимости двигателя с учетом различных усовершенствований как инжекторный впрыск, турбо-наддув, переменную геометрию камеры

⁵⁸Influence on the Low Carbon Car Market from 2020-2030. Final Report. Element Energy, July 2011.

⁵⁹The King Review of Low-Carbon Cars, King Review 2007.

⁶⁰https://motor.ru/news/mwi-14-12-2018.htm?utm_source=from_lenta&referrer=longgrid_6

сгорания, применение материалов с малым сопротивлением трению и т.п.⁶¹ Предполагается, что усовершенствование ДВС отразится на его стоимости.

Прочие компоненты включают дополнительные устройства по управлению двигателем (например, система "стоп/старт"), очистке выбросов в окружающую среду и др. Величина этих издержек сможет оставлять 900-1400 долл. с некоторым снижением в перспективе.⁶² Отдельные составляющие дополнительных затрат включают: системы очистки выхлопа – около 700 долл., системы "стоп/старт" – около 350 долл., усиление трансмиссии при системах "стоп/старт" – 250 долл.⁶³

Что касается шасси/кузова автомобиля, то с большой долей вероятности можно считать, что стоимость шасси будет оставаться постоянной. Во многом она зависит от конструкции автомобиля и производителя. В расчетах стоимость этой компоненты оценена в размере 12 тыс. долл.⁶⁴

В табл. 11 показаны принимаемые в расчетах значения стоимости ДВС в расчетах на перспективу.

Таблица 11. Ориентировочная оценка возможных изменений стоимости типового автомобиля компактного класса с ДВС, долл. (2015)

| | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Мощность, кВт | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 |
| Уд. расход топлива, л/100 км | 6 | 5,6 | 5 | 4,8 | 4,2 |
| Стоимость шасси, долл. | 12000 | 12000 | 12000 | 12000 | 12000 |
| Уд. стоимость ДВС, долл./кВт | 43 | 50 | 51 | 54 | 55 |
| ДВС, всего, долл. | 3655 | 4250 | 4335 | 4590 | 4675 |
| Прочие затраты | 1180 | 1200 | 1300 | 1400 | 1500 |
| Всего (округленно) | 17000 | 17415 | 17500 | 17700 | 17800 |

Источники: Tank to Wheels, Appendix 1, Concawe 2008, Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options, EPRI 2001; Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options for Compact Sedan and Sport Utility Vehicles, EPRI 2002; CONCAWE/EUCAR/JRC, Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, 2007; McKinsey Co. A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis, 2010

4.1.2. Ожидаемое сокращение выбросов и ущербов от загрязнения окружающей среды для автомобилей с ДВС

⁶¹Tank to Wheels, Appendix 1, Concawe 2008, Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options, EPRI 2001; Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options for Compact Sedan and Sport Utility Vehicles, EPRI 2002 (*цитировано Influence on the Low Carbon Car Market from 2020-2030. Final Report. Element Energy, July 2011*).

⁶²Influence on the Low Carbon Car Market from 2020-2030. Final Report. Element Energy, July 2011

⁶³The King Review of Low-Carbon Cars, King Review 2007; CONCAWE/EUCAR/JRC, Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, 2007.

⁶⁴McKinsey Co. A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis, 2010.

Расчет выбросов загрязняющих веществ для рассматриваемого автомобиля компакт-класса выполнен по модели GREET с учетом ожидаемых изменений в расходах топлива. При этом выбросы разделены на три группы: в процессе производства автомобиля, в процессе эксплуатации и в процессе производства и доставки моторного топлива до бака автомобиля. В расчетах принято, что автомобиль 65% своего пробега осуществляет в городском цикле, остальные 35% - в загородном цикле при общем годовом пробеге 20 тыс. км. В табл. 12 и 13 даны расчетные оценки выбросов для бензинового, дизельного и газового автомобилей в 2015 и 2035 гг

Таблица 12. Оценка годовых выбросов автомобилей с ДВС по элементам цикла в 2015 г., кг/год*

| <i>Тип автомобиля / выбросы</i> | <i>GHGs</i> | <i>VOC</i> | <i>CO</i> | <i>NOx</i> | <i>PM10</i> | <i>PM2.5</i> | <i>SOx</i> |
|---------------------------------|-------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Бензиновый | 4405 | 6,122 | 24,985 | 4,206 | 2,253 | 0,944 | 2,989 |
| Производство авто | 806 | 3,038 | 5,675 | 1,172 | 1,499 | 0,607 | 2,055 |
| Эксплуатация городской цикл | 2026 | 1,445 | 13,089 | 0,787 | 0,230 | 0,119 | 0,033 |
| Эксплуатация загородный цикл | 868 | 0,619 | 5,610 | 0,337 | 0,098 | 0,051 | 0,014 |
| Топливный цикл | 706 | 1,020 | 0,611 | 1,910 | 0,425 | 0,167 | 0,887 |
| Дизельный | 5119 | 3,958 | 11,164 | 5,374 | 2,185 | 1,250 | 2,986 |
| Производство авто | 685 | 2,582 | 4,824 | 0,996 | 1,275 | 0,516 | 1,747 |
| Эксплуатация городской цикл | 2184 | 0,601 | 3,702 | 0,967 | 0,209 | 0,107 | 0,000 |
| Эксплуатация загородный цикл | 936 | 0,257 | 1,586 | 0,414 | 0,089 | 0,046 | 0,000 |
| Топливный цикл | 1314 | 0,518 | 1,051 | 2,997 | 0,612 | 0,581 | 1,240 |
| Газовый | 4307 | 4,959 | 25,045 | 5,168 | 2,300 | 0,932 | 3,615 |
| Производство авто | 806 | 3,038 | 5,675 | 1,172 | 1,499 | 0,607 | 2,055 |
| Эксплуатация городской цикл | 1672 | 1,115 | 13,089 | 0,787 | 0,230 | 0,119 | 0,007 |
| Эксплуатация загородный цикл | 716 | 0,478 | 5,610 | 0,337 | 0,098 | 0,051 | 0,003 |
| Топливный цикл | 1113 | 0,329 | 0,671 | 2,873 | 0,473 | 0,156 | 1,550 |
| GTL | 6022 | 4,656 | 13,134 | 6,322 | 2,570 | 1,470 | 3,513 |
| Производство авто | 806 | 3,038 | 5,675 | 1,172 | 1,499 | 0,607 | 2,055 |
| Эксплуатация городской цикл | 2569 | 0,707 | 4,355 | 1,137 | 0,246 | 0,126 | 0,000 |
| Эксплуатация загородный цикл | 1101 | 0,303 | 1,866 | 0,487 | 0,105 | 0,054 | 0,000 |
| Топливный цикл | 1546 | 0,609 | 1,237 | 3,526 | 0,720 | 0,683 | 1,458 |

* Для расчетных условий.

Таблица 13. Оценка годовых выбросов автомобилей с ДВС по элементам цикла в 2035 г., кг/год*

| Тип автомобиля / выбросы | GHGs | VOC | CO | NOx | PM10 | PM2.5 | SOx |
|------------------------------|-------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Бензиновый | 3084 | 4,286 | 17,489 | 2,944 | 1,577 | 0,661 | 2,092 |
| Производство авто | 564 | 2,126 | 3,973 | 0,820 | 1,050 | 0,425 | 1,438 |
| Эксплуатация городской цикл | 1418 | 1,012 | 9,162 | 0,551 | 0,161 | 0,083 | 0,023 |
| Эксплуатация загородный цикл | 608 | 0,434 | 3,927 | 0,236 | 0,069 | 0,036 | 0,010 |
| Топливный цикл | 494 | 0,714 | 0,427 | 1,337 | 0,298 | 0,117 | 0,621 |
| Дизельный | 3583 | 2,770 | 7,815 | 3,762 | 1,529 | 0,875 | 2,090 |
| Производство авто | 479 | 1,807 | 3,377 | 0,697 | 0,892 | 0,361 | 1,223 |
| Эксплуатация городской цикл | 1529 | 0,420 | 2,591 | 0,677 | 0,146 | 0,075 | 0,000 |
| Эксплуатация загородный цикл | 655 | 0,180 | 1,111 | 0,290 | 0,063 | 0,032 | 0,000 |
| Топливный цикл | 920 | 0,362 | 0,736 | 2,098 | 0,428 | 0,406 | 0,868 |
| Газовый | 3015 | 3,471 | 17,531 | 3,618 | 1,610 | 0,653 | 2,531 |
| Производство авто | 564 | 2,126 | 3,973 | 0,820 | 1,050 | 0,425 | 1,438 |
| Эксплуатация городской цикл | 1170 | 0,780 | 9,162 | 0,551 | 0,161 | 0,083 | 0,005 |
| Эксплуатация загородный цикл | 501 | 0,334 | 3,927 | 0,236 | 0,069 | 0,036 | 0,002 |
| Топливный цикл | 779 | 0,231 | 0,470 | 2,011 | 0,331 | 0,109 | 1,085 |
| GTL | 4215 | 3,259 | 9,194 | 4,426 | 1,799 | 1,029 | 2,459 |
| Производство авто | 564 | 2,126 | 3,973 | 0,820 | 1,050 | 0,425 | 1,438 |
| Эксплуатация городской цикл | 1798 | 0,495 | 3,049 | 0,796 | 0,172 | 0,088 | 0,000 |
| Эксплуатация загородный цикл | 771 | 0,212 | 1,307 | 0,341 | 0,074 | 0,038 | 0,000 |
| Топливный цикл | 1082 | 0,426 | 0,866 | 2,468 | 0,504 | 0,478 | 1,021 |

* Для расчетных условий.

Как видно из расчетов, около двух третей выбросов происходят в процессе эксплуатации автомобиля; остальная треть распределена между производством автомобиля (13-18%) и топливным циклом (15-22%). Основные выбросы в количественном выражении приходятся на CO₂ и составляют в целом 4,5-6 т CO₂ в год в настоящее время. В соответствии с ожидаемой динамикой снижения расходов топлива в автомобилях с ДВС выбросы к 2035 несколько сократятся до 3,5-5 т CO₂ в год.

В табл. 14и 15показаны оценки годового ущерба для сравниваемых типов автомобилей с ДВС при годовом пробеге 20 тыс. км. в 2015 и 2035 гг.

Использование верхних значений ущербов от выбросов CO₂ приводит к увеличению суммарного годового ущерба примерно в 2,5 раза.

4.1.3. Расчет стоимости эксплуатации автомобилей с ДВС

В конечном итоге были рассчитаны оценки стоимости эксплуатации легковых автомобилей с ДВС в 2015 и 2035 гг. (рис. 3). На рисунках выделены три компонента: *стоимость энергии, затраты, связанные со стоимостью автомобиля и ожидаемые экологические ущербы.*

Таблица 14. Расчетные значения компонентов полной стоимости ущерба для окружающей среды в 2015 г. от автомобилей с ДВС при минимальных и максимальных оценках ущерба от вредных выбросов в атмосферу (1 и 3),
долл./год*

| Тип автомобиля / выбросы | GHGs (1)** | GHGs (3)** | VOC | CO | NOx | PM 10 | PM 2.5 | SOx | Итого (1)** | Итого (3)** |
|------------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| Бензиновый | 74,89 | 74,89 | 24,78 | 19,23 | 143,56 | 14,60 | 82,17 | 97,92 | 457,14 | 457,14 |
| Производство авто | 13,70 | 13,70 | 4,25 | 0,79 | 18,04 | 5,67 | 27,36 | 80,56 | 150,37 | 150,37 |
| Эксплуатация городской цикл | 34,44 | 34,44 | 20,24 | 18,32 | 121,19 | 8,68 | 53,58 | 12,95 | 269,40 | 269,40 |
| Эксплуатация загородный цикл | 14,76 | 14,76 | 0,11 | 0,10 | 0,65 | 0,05 | 0,29 | 0,07 | 16,02 | 16,02 |
| Топливный цикл | 12,00 | 12,00 | 0,18 | 0,01 | 3,68 | 0,20 | 0,94 | 4,34 | 21,35 | 21,35 |
| Дизельный | 87,02 | 87,02 | 12,16 | 5,90 | 170,77 | 13,04 | 75,10 | 74,55 | 438,53 | 438,53 |
| Производство авто | 11,64 | 11,64 | 3,61 | 0,68 | 15,34 | 4,82 | 23,26 | 68,47 | 127,81 | 127,81 |
| Эксплуатация городской цикл | 37,12 | 37,12 | 8,41 | 5,18 | 148,86 | 7,89 | 48,31 | 0,00 | 255,78 | 255,78 |
| Эксплуатация загородный цикл | 15,91 | 15,91 | 0,05 | 0,03 | 0,80 | 0,04 | 0,26 | 0,00 | 17,08 | 17,08 |
| Топливный цикл | 22,34 | 22,34 | 0,09 | 0,02 | 5,77 | 0,29 | 3,27 | 6,07 | 37,86 | 37,86 |
| Газовый | 73,22 | 73,22 | 20,00 | 19,23 | 145,41 | 14,62 | 82,10 | 91,08 | 445,66 | 445,66 |
| Производство авто | 13,70 | 13,70 | 4,25 | 0,79 | 18,04 | 5,67 | 27,36 | 80,56 | 150,37 | 150,37 |
| Эксплуатация городской цикл | 28,42 | 28,42 | 15,60 | 18,32 | 121,19 | 8,68 | 53,58 | 2,92 | 248,71 | 248,71 |
| Эксплуатация загородный цикл | 12,18 | 12,18 | 0,08 | 0,10 | 0,65 | 0,05 | 0,29 | 0,02 | 13,36 | 13,36 |
| Топливный цикл | 18,93 | 18,93 | 0,06 | 0,01 | 5,53 | 0,22 | 0,88 | 7,59 | 33,22 | 33,22 |
| GTL | 102,37 | 102,37 | 14,31 | 6,95 | 200,90 | 15,34 | 88,35 | 87,70 | 515,91 | 515,91 |

| | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------|-------|------|------|--------|------|-------|-------|--------|--------|
| Производство авто | 13,70 | 13,70 | 4,25 | 0,79 | 18,04 | 5,67 | 27,36 | 80,56 | 150,37 | 150,37 |
| Эксплуатация городской цикл | 43,67 | 43,67 | 9,89 | 6,10 | 175,13 | 9,28 | 56,83 | 0,00 | 300,91 | 300,91 |
| Эксплуатация загородный цикл | 18,72 | 18,72 | 0,05 | 0,03 | 0,94 | 0,05 | 0,30 | 0,00 | 20,10 | 20,10 |
| Топливный цикл | 26,28 | 26,28 | 0,11 | 0,02 | 6,79 | 0,34 | 3,85 | 7,15 | 44,54 | 44,54 |

* При минимальных значениях стоимости энергоносителей (см. табл. 6).

** (1) – минимальная оценка ущербов от выбросов CO₂, (3) – максимальная оценка (см. табл.8).

*Таблица 15. Расчетные значения компонентов полной стоимости ущербов для окружающей среды в 2035 г. от автомобилей с ДВС при минимальных и максимальных оценках ущерба от выбросов CO₂ (1 и 3), долл./год**

| Тип автомобиля / выбросы | GHGs (1)** | GHGs (3)** | VOC | CO | NO _x | PM 10 | PM 2.5 | SO _x | Итого (1)** | Итого (3)** |
|------------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|-------------|-------------|
| Бензиновый | 95,60 | 508,83 | 17,34 | 13,46 | 100,49 | 10,22 | 57,52 | 68,55 | 363,17 | 776 |
| Производство авто | 17,48 | 93,05 | 2,98 | 0,56 | 12,63 | 3,97 | 19,15 | 56,39 | 113,15 | 189 |
| Эксплуатация городской цикл | 43,96 | 234,00 | 14,16 | 12,83 | 84,83 | 6,08 | 37,50 | 9,07 | 208,44 | 398 |
| Эксплуатация загородный цикл | 18,84 | 100,28 | 0,08 | 0,07 | 0,45 | 0,03 | 0,20 | 0,05 | 19,72 | 101 |
| Топливный цикл | 15,31 | 81,50 | 0,12 | 0,01 | 2,57 | 0,14 | 0,66 | 3,04 | 21,86 | 88 |
| Дизельный | 111,07 | 591,20 | 8,51 | 4,13 | 119,54 | 9,13 | 52,57 | 52,18 | 357,13 | 837 |
| Производство авто | 14,86 | 79,09 | 2,53 | 0,47 | 10,73 | 3,37 | 16,28 | 47,93 | 96,18 | 160 |
| Эксплуатация городской цикл | 47,39 | 252,22 | 5,89 | 3,63 | 104,20 | 5,52 | 33,82 | 0,00 | 200,44 | 405 |
| Эксплуатация загородный цикл | 20,31 | 108,10 | 0,03 | 0,02 | 0,56 | 0,03 | 0,18 | 0,00 | 21,13 | 109 |
| Топливный цикл | 28,52 | 151,79 | 0,06 | 0,01 | 4,04 | 0,20 | 2,29 | 4,25 | 39,38 | 163 |
| Газовый | 93,46 | 497,44 | 14,00 | 13,46 | 101,79 | 10,23 | 57,47 | 63,76 | 354,17 | 758 |
| Производство авто | 17,48 | 93,05 | 2,98 | 0,56 | 12,63 | 3,97 | 19,15 | 56,39 | 113,15 | 189 |

| | | | | | | | | | | |
|------------------------------|---------------|---------------|--------------|-------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------|-----|
| Эксплуатация городской цикл | 36,27 | 193,07 | 10,92 | 12,83 | 84,83 | 6,08 | 37,50 | 2,04 | 190,48 | 347 |
| Эксплуатация загородный цикл | 15,55 | 82,74 | 0,06 | 0,07 | 0,45 | 0,03 | 0,20 | 0,01 | 16,37 | 84 |
| Топливный цикл | 24,16 | 128,58 | 0,04 | 0,01 | 3,87 | 0,16 | 0,61 | 5,32 | 34,16 | 139 |
| GTL | 130,68 | 695,53 | 10,01 | 4,86 | 140,63 | 10,74 | 61,84 | 61,39 | 420 | 985 |
| Производство авто | 17,48 | 93,05 | 2,98 | 0,56 | 12,63 | 3,97 | 19,15 | 56,39 | 113 | 189 |
| Эксплуатация городской цикл | 55,75 | 296,73 | 6,93 | 4,27 | 122,59 | 6,50 | 39,78 | 0,00 | 236 | 477 |
| Эксплуатация загородный цикл | 23,89 | 127,17 | 0,04 | 0,02 | 0,66 | 0,03 | 0,21 | 0,00 | 25 | 128 |
| Топливный цикл | 33,55 | 178,58 | 0,07 | 0,02 | 4,75 | 0,24 | 2,69 | 5,00 | 46 | 191 |

* При минимальных значениях стоимости энергоносителей (см. табл. 6).

** (1) – минимальная оценка ущербов от выбросов CO₂, (3) – максимальная оценка (см. табл.8).

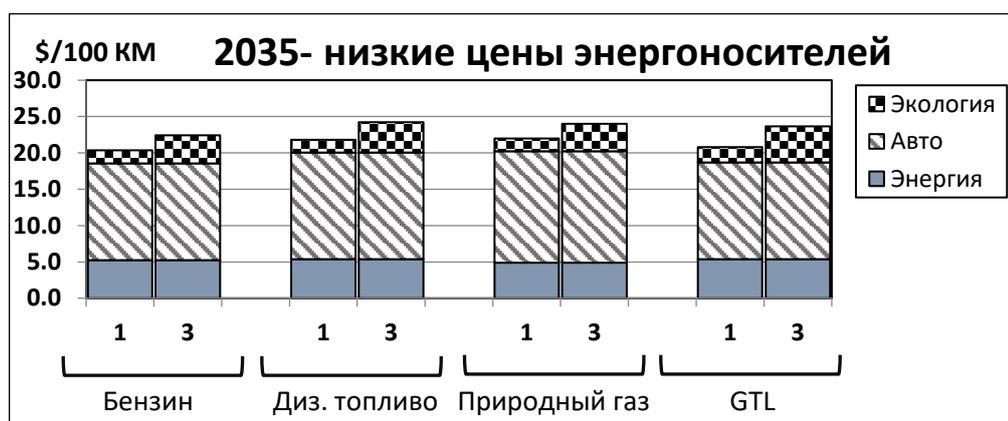
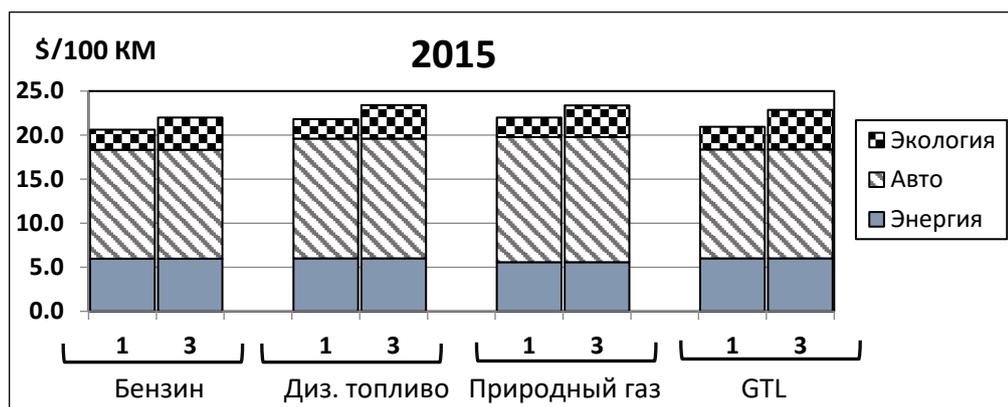


Рис. 3. Стоимость эксплуатации авто с ДВС при минимальных ценах на энергоносители (1 и 3 – минимальные и максимальные оценки экологического ущерба от выбросов CO₂)

Как следует из расчетов, в настоящее время автомобиль с ДВС на всех рассмотренных видах топлива оказываются практически равноэкономичными в пределах 21-23 долл./100км (с учетом экологического ущерба). Небольшие преимущества имеют авто с бензиновым двигателем. К 2035 г. не следует ожидать больших изменений в экономичности авто с ДВС: снижение удельных расходов топлива будет скомпенсировано увеличением стоимости энергоносителей и ростом экологической составляющей затрат.

4.2. Электромобиль

4.2.1. Пути совершенствования электромобиля

Электромобиль в общепринятом понимании относится к разряду транспортных средств, которые приводятся в движение от электродвигателя, питаемого от электроаккумулятора (батареи), заряжаемого от сети.⁶⁵

⁶⁵ В строгом смысле слова автомобиль с топливными элементами также можно отнести к разряду электромобилей, т.к. в нем используется электродвигатель, питаемый от электроэнергии, вырабатываемой непосредственно на борту автомобиля.

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.

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 ToyotaPrius 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 ToyotaPrius последующих выпусков, ChevroletVolt, OpelAmpera и др.
- Электромобиль – полностью электрический автомобиль содержит только аккумулятор и электродвигатель. Зарядка автомобиля осуществляется от сети. Примерами чистых электромобилей являются NissanLeaf, MitsubishiI-MiEV, BMWi3 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.16 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 [49].

Таблица 16. Некоторые характеристики современных электромобилей (2017)

| Тип электромобиля | Цена, тыс. долл. | Мощность, кВт | Емкость аккумулятора, кВтч | Пробег, км | Уд. расход электроэнергии, кВтч/100 км |
|-------------------------|------------------|---------------|----------------------------|------------|--|
| 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>)

В 2017 г. в мире насчитывалось около 3 млн. электромобилей из 800 млн. общего числа автомобилей.⁶⁶ Между тем, темпы годового прироста продаж электромобилей составил в том году 22%. Производители электромобилей вложили в их производство 90 млрд. долл., что свидетельствует об интенсивном развитии этого сектора в ближайшие десятилетия.

Основным фактором, который определяет эффективность электромобилей, является создание высокоэффективных и дешевых устройств для хранения электроэнергии на борту электромобиля.

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

⁶⁶ Carbon Tracker 2018. 2020 vision: why you should see the fossil fuel peak coming in the next decade.

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.⁶⁷

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 с 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, что цены к 2020 г. будут находиться на уровне 100 – 200 долл./кВтч.⁶⁸ 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.⁶⁹

Интересные прогнозы по стоимости электроаккумуляторов даются в работе,⁷⁰ 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

⁶⁷<https://www.economist.com/graphic-detail/2017/08/14/the-growth-of-lithium-ion-battery-power>

⁶⁸http://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

⁶⁹http://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

⁷⁰http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/forecast-2030--stored-electricity-at-005-kwh_100016581

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 SupervaultInc. (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.⁷¹ 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.⁷² 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.).⁷³ Обеспечение такого спроса потребует инвестиций в размере около 325 млрд. долл. (из расчета 100 млн. долл. за 1 млрд. кВтч).⁷⁴

Потребление металлов в аккумуляторах. Эффективность электроаккумуляторов во многом определяется использованием металлов, в первую очередь таких, как литий, никель, кобальт, меди 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.⁷⁵

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),
- 3) катод (различные сплавы на основе никеля, кобальта, алюминия, марганца).

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

⁷¹<http://www.azonano.com/news.aspx?newsID=32513>

⁷²<http://cleantechnica.com/2015/09/21/bosch-solid-state-lithium-ion-batteries-could-hit-ev-market-within-5-years/>

⁷³ Goldman Sachs Group. Electric Vehicle Boom: ICE-ing The Combustion Engine, September 6, 2017.

⁷⁴ Там же, с. 29.

⁷⁵ S&P Global, Platts. Changing Lanes: A Road map for Transport and Future Energy Markets, February 2018, www.platts.com

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.⁷⁶ 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 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 соответствует примерно 12 кг лития на один электромобиль. В 2016 г. мировое производство лития составило 31,5 тыс. т,⁷⁷ из них в производстве литий-ионных аккумуляторов было использовано около 40%, из которых 14% приходилось на аккумуляторные батареи для электромобилей.⁷⁸ 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.)⁷⁹ достаточны для того, чтобы вполне удовлетворить ожидаемое увеличение спроса на производство 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,⁸⁰ ожидается, что рынок анодного графита (натурального и синтетического)

⁷⁶ Goldman Sachs Group. Electric Vehicle Boom: ICE-ing The Combustion Engine, September 6, 2017, p. 35.

⁷⁷ Там же, p. 35.

⁷⁸ EUROPEAN COMMISSION. Report on Raw Materials for Battery Applications. Brussels, 17.5.2018 SWD(2018) 245 final.

⁷⁹ Goldman Sachs Group. Electric Vehicle Boom: ICE-ing The Combustion Engine, September 6, 2017, p. 35.

⁸⁰ <https://www.benchmarkminerals.com/category/graphite/>

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 могут возникать с организацией зарядки аккумуляторов. В особенности это относится к двум факторам: времени зарядки и частоты зарядки. Частота зарядки 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.

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%.⁸¹

⁸¹<http://www.greenbiz.com/blog/2013/01/17/how-important-charging-infrastructure-ev-adoption>

- *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 полностью заряженный. Однако, это возможно организовать только на специально приспособленных электромобилях и требует инфраструктуры для быстрой замены аккумуляторов. Идею реализовала General Motors в проекте Nu-Wire. Компания Тгеха заявила о готовности запустить серийное производство платформ для различных электромобилей, но процесс требует не только технического решения, но и согласования с большим количеством компаний, выпускающих электромобили.

В России принято правительственное решение с установить на всех АЗС специальные стойки 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.⁸²

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 потока значительно больше.

Преимущества беспроводной зарядки проявляются в следующих обстоятельствах:

- Полная автономия транспортных средств от необходимости искать заправочную станцию. Зарядка осуществляется в процессе движения автомобиля.

- Зарядная станция не требуется, что является более удобным для пользователя, т.к. нет необходимости поиска АЗС поскольку зарядка происходит автоматически в процессе движения электромобиля или на специально организованной стоянке, имеющей подземный зарядный кабель.

- Возможность использования батарей меньшей емкости, что снижает стоимость и вес автомобиля.

Между тем, существует ряд принципиальных недостатков беспроводной зарядки:

- Потеря энергии при возрастает 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.

⁸²<https://hi-tech.mail.ru/review/kak-ehlektromobili-zahvatyvayut-mir-i-pochemu-rossiya-soprotivlyaetsya/>

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

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 беспроводная зарядка будет доступна в некоторых из ее моделей уже в 2018 г.⁸³

Электромотор. Электромотор является важной частью электромобиля. Существуют две концепции использования электромотора: в качестве центрального двигателя и в качестве колесных двигателей. 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.⁸⁴ 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.⁸⁵ 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.

Шасси/кузов. По оценкам, стоимость шасси/кузова электромобиля оценивается несколько выше, чем для автомобиля с ДВС в связи с необходимостью размещения громоздкого аккумулятора. Поэтому в расчетах эта компонента стоимости электромобиля принята равной около 12-15 тыс. долл.⁸⁶

⁸³www.slashgear.com

⁸⁴MIT. In the Road in 2035, 2008

⁸⁵Influence on the Low Carbon Car Market from 2020-2030. Final Report. Element Energy, July 2011

⁸⁶McKinsey Co. A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis, 2010

Перспективы снижения стоимости электромобиля. В табл. 17 показаны прогнозные оценки стоимости основных компонентов электромобиля, которые были использованы для оценки эффективности альтернативных технологий на автотранспорте.

Таблица 17. Ориентировочная оценка возможных изменений в стоимости электромобиля, долл. (2015).

| | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Мощность, кВт | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 |
| Суточный пробег, км | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Уд. расход электроэнергии, кВтч/100 км | 20 | 18 | 17 | 16 | 15 |
| Емкость аккумулятора, кВтч | 60 | 54 | 51 | 48 | 45 |
| Уд. стоимость аккумулятора, долл./кВтч | 300 | 250 | 200 | 150 | 100 |
| Аккумулятор, всего, долл. | 18000 | 13500 | 10200 | 7200 | 4500 |
| Шасси, долл. | 12000 | 12000 | 12000 | 12000 | 12000 |
| Уд. стоимость электромоторов, долл./кВт | 50 | 20 | 15 | 10 | 8 |
| Электромоторы, всего, долл. | 4250 | 1700 | 1275 | 850 | 680 |
| Прочие затраты, долл. | 2360 | 2400 | 2600 | 2800 | 3000 |
| <i>Всего (округленно), долл.*</i> | <i>40000</i> | <i>29500</i> | <i>26000</i> | <i>23000</i> | <i>20000</i> |

* При массовом производстве

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/

В результате технических усовершенствований и использования более дешевых материалов стоимость электромобиля может снизиться на 40-45%. Между тем, ожидается, что автомобиль компакт-класса с ДВС все же останется в ближайшие 15-20 лет более дешевым, чем электромобиль.

4.2.2. Ожидаемое сокращение выбросов и ущербов от загрязнения окружающей среды от электромобиля

Основные выбросы электромобиля в окружающую среду происходят в процессе производства электроэнергии. Основная часть выбросов по весу

приходится на углекислый газ (CO₂). Однако эта компонента сильно зависит от структуры потребления топлива в электроэнергетике, которая в различных странах сильно отличается. Это затрудняет получение однозначного вывода относительно определенной электротехнологии в целом по миру. Так, в 2012 г. выработка электроэнергии России сопровождалась выбросами CO₂ в размере 0,75 кг/кВтч, в США – 0,52, в Китае – 0,85.⁸⁷ В расчетах, приведенных ниже, приняты усредненные данные по снижению выбросов парниковых газов в электроэнергетике в целом по миру.

В табл. 18 показаны расчетные значения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в результате использования электромобильного транспорта в изготовлении транспортного средства, топливном цикле и при его эксплуатации в городском и загородном режиме езды. Для расчета была использована модель GREET.

*Таблица 18. Оценка годовых выбросов электромобиля по элементам цикла в 2015 и 2035 гг., кг/год**

| | GHGs | VOC | CO | NOx | PM10 | PM2.5 | SOx |
|------------------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 2015 | | | | | | | |
| Всего выбросов | 1950 | 3,52 | 6,32 | 4,37 | 5,42 | 1,67 | 10,11 |
| Производство авто | 460 | 3,28 | 5,548 | 1,308 | 1,57 | 0,627 | 3,68 |
| Эксплуатация городской цикл | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,18 | 0,06 | 0 |
| Эксплуатация загородный цикл | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,076 | 0,027 | 0 |
| Топливный цикл | 1490 | 0,24 | 0,77 | 3,07 | 3,59 | 0,96 | 6,43 |
| 2035 | | | | | | | |
| Всего выбросов | 1463 | 2,64 | 4,734 | 3,28 | 4,06 | 1,25 | 7,58 |
| Производство авто | 345 | 2,46 | 4,15 | 0,98 | 1,18 | 0,47 | 2,76 |
| Эксплуатация городской цикл | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,13 | 0,05 | 0 |
| Эксплуатация загородный цикл | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,06 | 0,02 | 0 |
| Топливный цикл | 1118 | 0,18 | 0,58 | 2,30 | 2,70 | 0,72 | 4,82 |

* Для расчетных условий.

На основе расчета годовых выбросов загрязнителей атмосферы в варианте с электромобилем оценены стоимостные ущербы для окружающей среды для 2015 и 2035 гг. (табл. 19 и 20). В соответствии с принятым

⁸⁷ Рассчитано по энергетическим балансам стран мира за 2012 г. [58].

методическим подходом эти ущербы на 100 км пробега включают три компоненты: производство электромобиля, топливный цикл от добычи топлива до АЗС (Well-to-Wheel) и эксплуатацию электромобиля в городском и загородном циклах.

Таблица 19. Расчетные значения компонентов полной стоимости ущербов от электромобилей в 2015 г. при минимальных и максимальных оценках ущерба для окружающей среды от вредных выбросов в атмосферу, долл./год*

| | GHGs (1)** | GHGs (3)** | VOC | CO | NOx | PM10 | PM2.5 | SOx | Итого (1)** | Итого (3)** |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|------------------------|------------------------|
| Всего | 33 | 156 | 4,63 | 0,79 | 25,97 | 14,40 | 62,183 | 175,72 | 317 | 440 |
| Производство авто | 7,82 | 36,8 | 4,59 | 0,78 | 20,07 | 5,93 | 28,02 | 144,23 | 211,43 | 240,41 |
| Эксплуатация городской цикл | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 6,74 | 28,63 | 0,00 | 35 | 35 |
| Эксплуатация загородный цикл | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,15 | 0,00 | 0,19 | 0,19 |
| Топливный цикл | 25,33 | 119,2 | 0,04 | 0,01 | 5,90 | 1,70 | 5,39 | 31,49 | 70 | 163,87 |

* При минимальных значениях стоимости энергоносителей (см. табл. 6).

** (1) – минимальная оценка ущербов от выбросов CO₂, (3) – максимальная оценка (см. табл.8).

Таблица 20. Расчетные значения компонентов полной стоимости ущербов электромобиля в 2035 г. при минимальных и максимальных оценках ущерба для окружающей среды от вредных выбросов в атмосферу, долл./год*

| | GHGs (1)** | GHGs (3)** | VOC | CO | NOx | PM10 | PM2.5 | SOx | Итого (1)** | Итого (3)** |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|------------------------|
| Всего | 45 | 241 | 3,474 | 0,592 | 19,481 | 10,802 | 46,637 | 131,79 | 258 | 454 |
| Производство авто | 10,70 | 56,93 | 3,44 | 0,58 | 15,05 | 4,45 | 21,01 | 108,17 | 163 | 210 |
| Эксплуатация городской цикл | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,06 | 21,47 | 0,00 | 27 | 27 |
| Эксплуатация загородный цикл | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,12 | 0,00 | 0 | 0 |
| Топливный цикл | 34,64 | 184,39 | 0,03 | 0,01 | 4,43 | 1,27 | 4,04 | 23,62 | 68 | 218 |

* При минимальных значениях стоимости энергоносителей (см. табл. 6).

** (1) – минимальная оценка ущербов от выбросов CO₂, (3) – максимальная оценка (см. табл.8).

4.2.3. Расчет стоимости эксплуатации электромобиля

В отличие от ДВС электромобиль имеет другую структуру затрат. В настоящее время доля стоимости электромобиля занимает 80-85% в годовых затратах при 9-13% приходящихся на энергию и 5-6% - на стоимость ущерба. В перспективе следует ожидать роста энергетической составляющей и снижения доли затрат, связанных со стоимостью электромобиля: энергия – 12-20%, стоимость электромобиля – 70-80% и ущерба – 6-10%. При этом, учитывая, что электромобиль будет оставаться более дорогим средством, чем традиционный автомобиль с ДВС, то снижение величины годового пробега будет оказывать негативное влияние на экономику электромобиля.

На рис. 4 приведены значения стоимости эксплуатации электромобиля при минимальных оценках стоимости энергоносителей (табл. 6) и минимальной и максимальной величинах оценки стоимости ущерба от загрязнения окружающей среды (табл. 19 и 20).

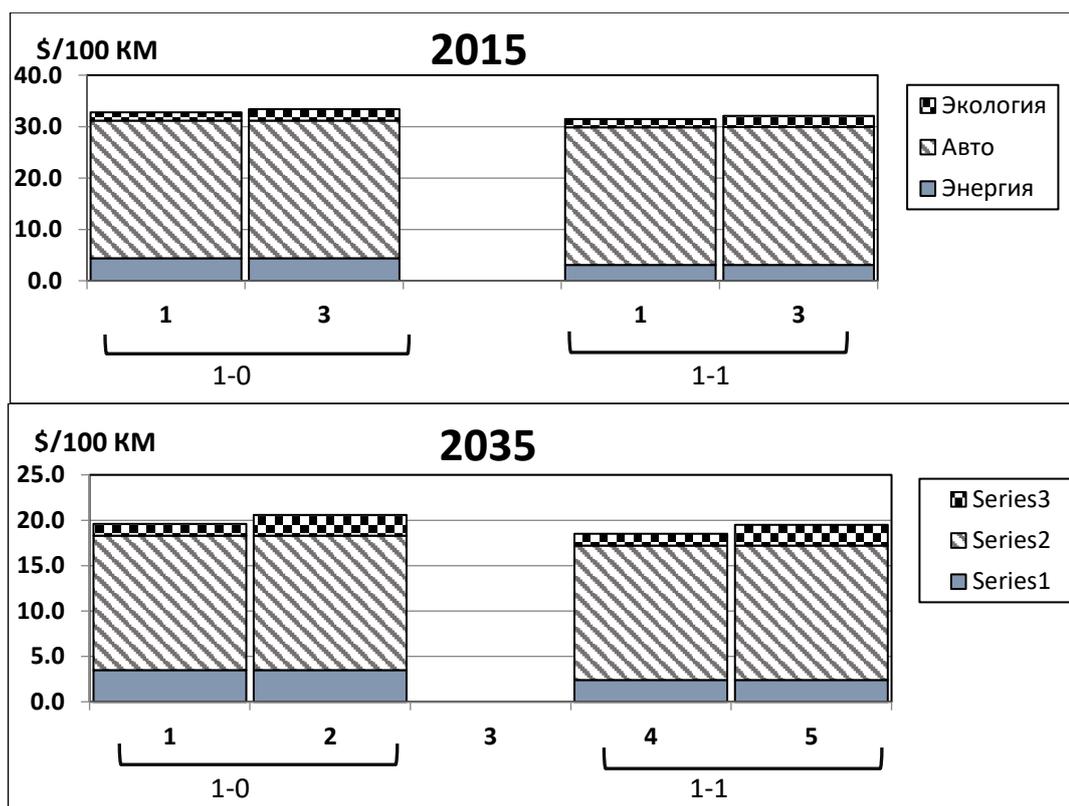


Рис. 4. Стоимость эксплуатации электромобилей в 2015 и 2035 гг. при минимальных ценах на энергоносители (1) и различных режимах зарядки аккумуляторов (0- возможность круглосуточной зарядки, 1 – зарядка только в ночное время при сниженных тарифах на электроэнергию)) (1 и 3 – минимальная и максимальная оценки экологического ущерба от выбросов CO₂)

Как следует из расчетов, полная стоимость эксплуатации электромобиля под влиянием рассмотренных факторов снизится с 31-33 долл./100 км в 2015 г. до 19-22 долл./100 км в 2035 г., т.е. на одну треть. При этом экологическая составляющая будет составлять около 1-3 долл./100 км.

4.3. Водородный автомобиль с ТЭ

4.3.1. Совершенствование водородного автомобиля с ТЭ

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 (HondaFCXClarity, HyundaiTucsonFuelCell, ToyotaMirai, HyundaiNexo). Многие компании имеют продвинутые концепты и прототипы, которые могут появиться в продаже в ближайшие годы.

В автомобиле с ТЭ наиболее проблемными факторами остаются:

- 1) стоимость водорода и связанная с ним инфраструктура производства, доставки и хранения,
- 2) степень совершенств 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. 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 Российской академией наук 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. Основные типы ТЭ показаны в табл. 21.

ТЭ типа PEM наиболее интересны и имеют серьезные перспективы для широкомасштабного использования. Они работают при температурах 50-100°C, используют ионообменную мембрану в качестве электролита, но требуют применения дорогостоящих платиновых катализаторов на аноде и катоде. Съем 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.). Эти свойства делают их особенно привлекательными для использования в транспортных средствах. Программы фирм, работающих в области ТЭ типа PEM, предусматривают доведение стоимости водородного двигателя до 50 долл./кВт и менее к 2020-2030 гг. Это является одним из решающих факторов для перехода на водородное топливо в транспортных системах. В автомобилях с ТЭ водород может находиться в одном из двух состояний: как газ под давлением (200-800 атм.) или в сжиженном виде (при -253°C). Это требует разработки специальных контейнеров повышенной безопасности.

По энергетической эффективности водородный автомобиль с ТЭ ненамного эффективнее ДВС. Так, полная энергоэффективность ТЭ при получении газообразного H_2 электролизом от энергосистемы составляет около 20-25% (то же для сжиженного H_2 не превышает 20%. Для сравнения КПД самого эффективного дизельного автомобиля с турбонаддувом и промежуточным охлаждением не превышает 50%, а для бензинового – 30% и ниже.⁸⁸

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 приходиться на транспортные системы. По типам ТЭ наибольшую долю по мощности будут занимать ТЭ PEM (65%), SOFC (9%) и остальные типы (26%). [74].

В автомобилях с ТЭ водород может находиться в одном из двух состояний: как газ под давлением 200-800 атм. или в сжиженном виде (при -253°C). Это требует разработки специальных контейнеров повышенной безопасности. Как видно на рис. 5, за 20 лет (1990-2005 гг.) стоимость ТЭ типа PEM была снижена с 3000 долл./кВт в 1990 г. до 275 долл./кВт в 2002 г, 73 долл./кВт в 2008 г. и 51 долл./кВт в 2010 г. 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.

При этом удельная мощность ТЭ увеличилась с менее 100 Вт/л в 1990 г. до 2500Вт/л в 2013 г. [74].

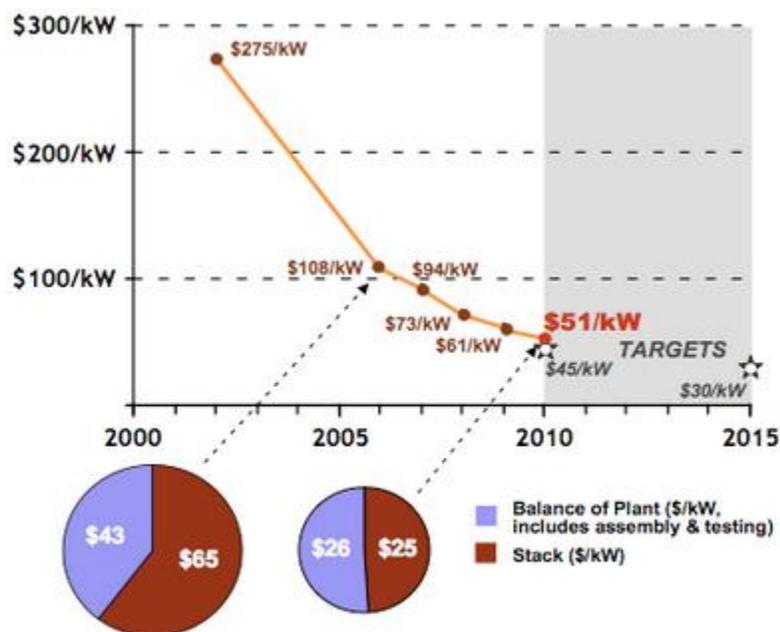
⁸⁸ Does a Hydrogen Economy Make Sense?. Proceedings of the IEEE, Vol. 94, No. 10, October 2006.

Таблица 21. Типы топливных элементов и их параметры

| <i>Тип ТЭ</i> | <i>Рабочая температура</i> | <i>Электролит</i> | <i>Топливо</i> | <i>Основные характеристики</i> | <i>КПД</i> |
|--|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--|------------|
| ТЭ спротонообменной мембраной (PEM) | ниже 100°C | Полимерная мембрана | Водород, метан, метанол, бензин | от 1 Вт до 250 кВт, \$200-1000/кВт | 40-70% |
| Твердооксидные ТЭ (SOFC) | 500-1000°C | Циркониевая керамика | Водород/CO/CH ₄ | от 200 кВт до 400 МВт, требует постоянной нагрузки, \$500-2000/кВт | 55-70% |
| ТЭ на основе карбонатов (MCFC), в стадии демонстрации | 600-800°C | Карбонат лития или калия | Водород/CO | от 2 до 400 МВт, требует постоянной нагрузки, \$600-2000/кВт | 50-60% |
| Кислотный ТЭ (PAFC), коммерчески освоены | 160-210°C | Фосфорная кислота | Водород, содержание CO и S до 1-2% | от 50 кВт до 400 МВт, \$1000-3000/кВт | 40-50% |
| Щелочной ТЭ (AFC), освоенная технология в отдельных сферах потребления | 50-100°C | Гидроксид калия | Водород | от 50 до 100 кВт | 45-60% |
| Метанольный ТЭ (DMFC) | 60-130°C | Полимерная мембрана | Смесь воды с метанолом, этанолом | менее 10 кВт | 40% |
| Регенеративный ТЭ (RFC), в разработке | 100-120°C | Замкнутая система разложения ВОДЫ | Вода | Требует дешевой энергии | н. д. |

Источники: Simbeck D., Chang E., Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways. Scoping Analysis, SFA Pacific, Inc. Mountain View, California, January 22, 2002 – July 22, 2002,

<http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32525.pdf>; Lovins A. Twenty Hydrogen Myths, Rocky Mountain Institute, 20 June 2003, updated 17 June 2005.



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

Рис. 5. Динамика затрат на производство ТЭ типа PEM [75].

По данным [76], средняя стоимость ТЭ составила 55 долл./кВт. Ожидается, что к 2020 г. она может снизиться до 40 долл.

Производство ТЭ в мире неуклонно возрастает. По данным PikeResearch,⁸⁹ продажи автомобилей с ТЭ достигнут 390 тыс. в год, а общий парк автомобилей с ТЭ составит 1,2 млн. К этому году транспортные системы с ТЭ будут генерировать годовой доход в размере 16,9 млрд. долл.

В 2016 г. во всем мире было выпущено более 60 тыс. устройств (около 500 МВт), из них около 1000 (300 МВт) были предназначены для использования в различного рода транспортных средствах [83, 84]. Для сравнения 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% этой величины будет приходиться на транспортные

⁸⁹<http://enfield.eu/news/latest-news/pike-research-forecasts-more-than-350000-stationary-fuel-cells-by-2022/>

системы. По типам ТЭ наибольшую долю по мощности будут занимать ТЭ PEM (65%), SOFC (9%) и остальные типы (26%).⁹⁰

За 20 лет (1990-2010 гг.) стоимость ТЭ типа PEM была снижена с 3000 долл./кВт в 1990 г. до 275 долл./кВт в 2002 г. и 73 долл./кВт в 2008 г. и 51 долл./кВт в 2010 г.⁹¹ В значительной мере сокращение стоимости ТЭ было достигнуто за счет снижения расходов платины. Если в начале 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 двигателя внутреннего сгорания. При этом удельная мощность ТЭ увеличилась с менее 100 Вт/л в 1990 г. до 2500Вт/л в 2013 г.⁹²

Прогресс в создании ТЭ позволяет надеяться, что автомобиль с ТЭ при успешном решении технических проблем может стать при определенных условиях реальным конкурентом для традиционных автомобилей с ДВС и электромобилей.

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 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

⁹⁰USDRIVE. Fuel Cell Technical Team Roadmap, June 2013 (energy.gov/sites/.../fctt_roadmap_june2013.pdf)

⁹¹http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/1004_fuel_cell_cost.pdf

⁹²USDRIVE. Fuel Cell Technical Team Roadmap, June 2013 (energy.gov/sites/.../fctt_roadmap_june2013.pdf)

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.⁹³

В настоящее время стоимость емкости для хранения водорода на борту автомобиля оценивается величиной 550-580 долл./кг H_2 (17-18 долл./кВтч). В 2017 г. ожидается снижение до 360 долл./кг H_2 (11-12 долл./кВтч) [76]. По оценкам [34], стоимость водородной системы при 700 атм. может снизиться к 2030 г. 150-250 долл./кг H_2 (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.⁹⁴ Поставки сжиженного водорода осуществляются в 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

⁹³http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv_challenges.shtml; <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>; <http://www.c2es.org/technology/factsheet/HydrogenFuelCellVehicles>

⁹⁴Amos W., Costs of Storing and Transporting Hydrogen, National Renewable Energy Laboratory, November 1998, <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/25106.pdf>

- 350 тыс. долл.), *трубопровод* – 2,4 млн. долл./км.⁹⁵Срок 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.).⁹⁶ [73]. 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.

Перспективы снижения стоимости автомобиля с ТЭ. В соответствии с рассмотренными в этом разделе тенденциями совершенствования основных компонентов автомобиля с ТЭ были составлены оценки ожидаемой стоимости этой технологии в период до 2035 г. (табл. 22). Эти оценки приняты в расчетах экономической эффективности пробега автомобиля с ТЭ.

Таблица 22. Ориентировочная оценка возможных изменений стоимости автомобиля с ТЭ

| | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Мощность, кВт | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 |
| Пробег на 1 заправке, км | 400 | 450 | 550 | 650 | 750 |
| Уд. расход H ₂ , кг H ₂ /100 км | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 |
| Шасси, долл. | 12000 | 12000 | 12000 | 12000 | 12000 |
| Уд. стоимость ТЭ, | 215 | 175 | 120 | 100 | 30 |

⁹⁵Hydrogen 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.

⁹⁶Wilson J. The Truth about Hydrogen. A Response to Amery Lonins' "Twenty Hydrogen Myths", Sept. 25, 2003

| | | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| долл./кВт | | | | | |
| ТЭ, всего, долл. | 18275 | 14875 | 1й0200 | 8500 | 2550 |
| Уд. стоимость емкости для H ₂ , долл./кгH ₂ | 650 | 550 | 350 | 200 | 175 |
| Размер емкости для H ₂ , кг | 4,4 | 4,95 | 6,05 | 7,15 | 8,25 |
| Емкость для H ₂ , долл. | 2860 | 2722,5 | 2117,5 | 1430 | 1443,75 |
| Электромотор, долл./кВт | 50 | 20 | 15 | 10 | 8 |
| Электромоторы, всего, долл. | 4250 | 1700 | 1275 | 850 | 680 |
| Прочие затраты, долл. | 2360 | 2400 | 2600 | 2800 | 3000 |
| Всего, долл. (округленно) | 40000 | 34000 | 28000 | 26000 | 20000 |

* При массовом производстве водородных автомобилей с ТЭ.

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; 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.

4.3.2. Экономика технологий получения водорода

Водород (H₂) - самый легкий и широко распространенный элемент во вселенной. Однако, он редко встречается в чистом виде на Земле. Преимущественно распространены соединения водорода с другими элементами, например, в виде воды (H₂O), метана (CH₄) или других углеводородов (C_nH_m). Уголь может содержать водород в размере 2-6% от веса.

Энергосодержание водорода в пересчете по весу очень высокое (1 кг H₂ эквивалентен 2,1 кг природного газа или 2,8 кг бензина) (см. табл. 4), но в пересчете на единицу объема он имеет наименьшее энергосодержание (1 л H₂ в газообразной форме при атмосферном давлении содержит 2,8 ккал, в сжиженном виде 2030 ккал по сравнению с почти 5000 ккал для 1 л природного газа или 7534 ккал для бензина). Для того, чтобы повысить энергосодержание единицы объема или веса водорода приходится его переводить в сжиженную форму. Это требует больших затрат энергии

(охлаждение до -253°C) или сжатие до высоких давлений (300-500 и более атм), что делает водород трудным для хранения и транспортировки.

Водород, подобно электроэнергии, является энергоносителем, но не энергоресурсом, поскольку он не существует в естественном виде в природе. Получение водорода основано на использовании сырья: воды, углеводородов или других природных материалов, содержащих водород в связанном виде. Производство водорода требует затрат энергии, получаемой из других источников: сгорания органического топлива, ядерной энергии или возобновляемых видов энергии (гидроэнергия, энергия ветра или солнца, биомасса). Энергосодержание водорода всегда меньше энергии, затраченной на его производство, а коэффициент полезного действия процессов получения водорода составляет от 20% до 80%.

В настоящее время водород используется в основном для производства химических продуктов, а не как энергоноситель. В 2013 г. мировое производство водорода оценивалось более, чем в 40 млн. т. Почти половина из этого количества получено из природного газа на основе паровой конверсии метана (ПКМ). Одна треть от этого количества приходится на нефтепереработку. По методу газификации угля приходится около 20% получаемого водорода. Электролиз обеспечивает только 4% годового производства водорода. Около 60% получаемого водорода используется в производстве аммиака, 30% - в нефтепереработке и примерно по 10% для получения метанола и других продуктов [61].

При сгорании в воздушной среде водород образует воду (H_2O). Поэтому считается, что водород является экологически чистым топливом, хотя в действительности это не совсем корректное утверждение, т.к. выбросы загрязняющих веществ могут происходить не на конечной стадии использования водорода, а в процессе его производства, транспорта и хранения. Лишь в комбинации с ядерной энергией или возобновляемыми источниками энергии водород может рассматриваться как достаточно "чистый" энергоноситель. Водород воспламеняется при концентрации от 4% до 74,5% (возгорание метана происходит при концентрациях от 2,1% до 9,5%), хотя взрывные концентрации для водорода значительно выше, чем для природного газа (между 18,3% до 59% в концентрации с воздухом для водорода по сравнению с 6,3%-14% для метана). Применение водорода требует по новому подходить к выбору материалов, контактирующих с этим элементом, т.к. водород легко вступает в реакцию с многими металлами, вследствие чего наблюдается водородная хрупкость металлов.

Накоплен определенный опыт технология транспорта и хранения водорода. Общая протяженность водородных трубопроводов в мире начитывает более 15 тыс. км (большинство в США), крупнейший

трубопровод протяженностью в 400 км на давление 100 атм. соединяет Антверпен (Бельгия) с Нормандией (Франция).

Учитывая серьезные проблемы с созданием инфраструктуры водородной энергетики и эффективными способами производства и использования водорода представляется, что переход к водородной энергетике может быть осуществлен поэтапно: от первоначального базирования на органических топливах (природный газ и уголь) к "чистым" способам на базе ядерной энергии и возобновляемых источников энергии.

Между тем, для того чтобы водород стал массовым коммерческим энергоносителем необходим, по крайней мере, на порядок снизить стоимость его производства и на два порядка – стоимость устройств для его использования. На решение этих двух задач сейчас сконцентрированы все усилия.

Существуют две принципиально различные концепции организации производства и использования водорода:

- *централизованное производство*, когда производство в достаточно крупных размерах сосредоточено в определенных местах, а водород доставляется к потребителям специализированным транспортом (эффект достигается за счет концентрации мощностей по производству водорода),
- *децентрализованные системы*, когда производство водорода в малых размерах приближено к месту его потребления, что исключает транспорт водорода до потребителя (эффект обеспечивается за счет сокращения транспортных издержек при перевозках водорода от производителя к потребителю).

Каждая из этих схем обладает определенными преимуществами и недостатками. Так, *при централизованном производстве водорода* имеет место более высокая эффективность преобразования природных энергоресурсов в водород за счет эффекта масштаба, легче обеспечивается безопасность производства, возникает реальная возможность улавливания вредных выбросов. При этом значительно удешевляется стоимость производства водорода, однако возникает необходимость в дорогостоящей транспортировке водорода в газообразном или сжиженном виде к непосредственным местам потребления, что увеличивает стоимость водорода у потребителя. Централизованные схемы позволяют использовать широкую гамму энергоресурсов для производства водорода: твердое и газообразное топливо, электроэнергию от энергосистемы или от ВИЭ, ядерную энергию через атомные электростанции или в виде высокотемпературного тепла.

Проблему транспортировки водорода решает *децентрализованное производство*, при котором водород производится в непосредственной

близости от потребителя. Это позволяет использовать существующие системы транспортировки традиционных энергоресурсов (газ, электроэнергия) до мест производства водорода. Основным преимуществом децентрализованных схем является их гибкость, возможность постепенного наращивания мощностей, исключение небезопасной транспортировки водорода. Правда, возможности сырьевой базы для производства водорода в таких системах оказываются ограниченными. По-видимому, в таких системах могут быть использованы только сетевые газ, электроэнергия и некоторые возобновляемые источники энергии. Естественно, за счет меньших производительностей удельные затраты производства в таких системах оказываются выше, чем в централизованных системах.

На современном этапе интерес представляют наиболее изученные и освоенные способы. Некоторые из них уже сейчас используются для производства водорода в химической и нефтеперерабатывающей промышленности. В обозримой перспективе наибольший интерес с практической точки зрения могут представлять:

- технологии на базе переработки органических топлив (*паровая конверсия метана, газификация угля*);
- технологии на базе электролиза воды (*электроэнергия от энергосистемы или получаемая на децентрализованных установках на основе использования возобновляемых источников энергии – в первую очередь, ветровой и солнечной энергии*);
- технологии на базе термохимического разложения воды (*с получением тепла от высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР)*).

В качестве готовых продуктов выступают *газообразный или сжиженный водород*.⁹⁷

Паровая конверсия метана (ПКМ). В процессах паровой каталитической конверсии в качестве исходного сырья могут использоваться природный газ, состоящий на 95-99% из метана, сухие газы нефтепереработки, бензин и водяной пар. Полная конверсия проходит в две стадии: *первая* (частичная конверсия) – конверсия гомологов метана преимущественно в метан на начальном участке реакционной зоны и *вторая* – конверсия метана с получением водорода и окислов углерода.

При паровой конверсии природного газа получается синтез-газ, богатый водородом (70-75% по сухой массе) вместе с CO (7-10%), CO₂ (6-14%) и с небольшим количеством метана (2-6%). Основной процесс ПКМ является эндотермическим, т.е. требует дополнительного подвода тепла,

⁹⁷В ИНП РАН разработаны развернутые модели для расчета стоимости получения газообразного и сжиженного водорода в системах централизованного и децентрализованного снабжения потребителей [авторы Синяк Ю.В. и Петров В.Ю.]

которое обеспечивается за счет сжигания некоторого количества природного газа. На последующих стадиях организуются дополнительные процессы, направленные на увеличение концентрации водорода и очистку его от примесей. В результате может быть получен водород высокой степени чистоты (99+%).

При объемах производства 100 т H_2 в сутки (4170 кг/ч) эффективность производства водорода может достигать 70-80% . На рис. 6 показана упрощенная схема паровой конверсии метана с выходом продукта (водорода) в виде сжатого газа. Параметры паровой конверсии для случая получения сжиженного водорода приведены на рис. 7⁹⁸.

В технологии производства сжатого водорода паровой конверсией метана удельные расходы на 1 кг H_2 составляют: природного газа – 5,0-5,5 куб. м; воды – 4-4,5 кг; электроэнергии – 0,7-0,9 кВтч. Выбросы CO_2 с учетом потерь природного газа при магистральном транспорте и выработке электроэнергии в энергосистеме достигают 9,5 кг/кг H_2 .

Технология ПКМ является наиболее эффективной по стоимости водорода, но имеет ряд проблем, прежде всего связанных с неизбежным ростом цен на природный газ в связи с истощением дешевых месторождений. Это приведет к неизбежному росту стоимости водорода, получаемого по этому методу. Кроме того, метод не является экологически абсолютно чистым, так как ему сопутствуют выбросы CO_2 и других парниковых газов, которые образуются как в самом процессе ПКМ, так и за его пределами в системе транспортировки газа и генерирования электроэнергии, вырабатываемой в энергосистеме, где в течение длительного времени еще будут преобладать тепловые электростанции, сжигающие органические виды топлива.

⁹⁸ В целях экономии места при описании других схем производства водорода мы будем опускать производство сжиженного водорода, так как этот модуль во всех схемах принят одинаковым.

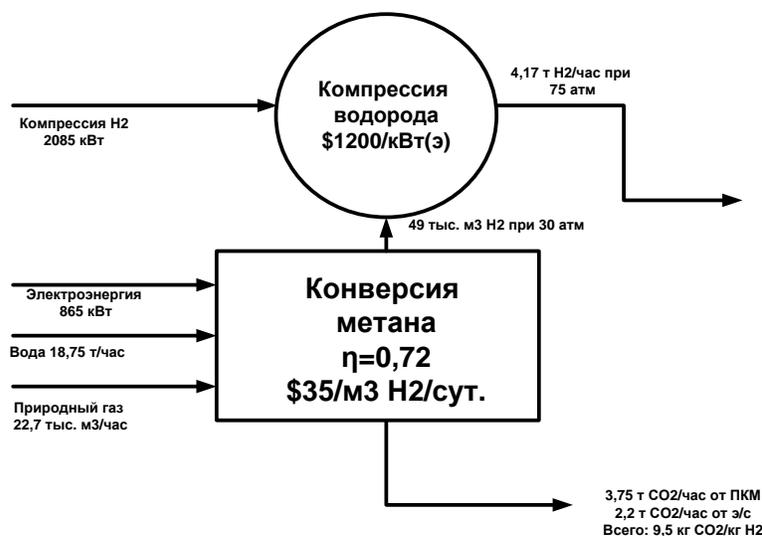


Рис. 6. Схема производства газообразного водорода из природного газа [21]

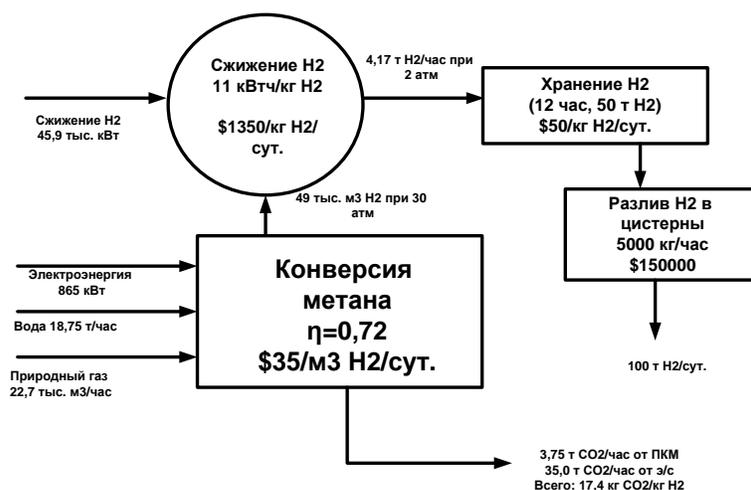


Рис. 7. Схема получения сжиженного водорода из природного газа [21]

Газификация твердых топлив. В процессе газификации водород может быть получен из большого числа видов твердого топлива: уголь, сланцы, торф, твердые органосодержащие отходы производства. Особый интерес для водородной энергетики представляют угли, природные запасы которых огромны и намного превышают запасы остальных органических топлив.

Процесс газификации угля осуществляется в несколько стадий. Итоговая реакция процесса газификации угля является эндотермической и для ее реального осуществления необходимо подводить к системе теплоту (900-1200°C). Эта теплота в конечном итоге может быть получена за счет дополнительного сжигания некоторого количества топлива, которое служит основой для получения синтез-газа (автотермический процесс).

Процесс газификации угля достаточно хорошо изучен, поскольку он широко использовался в мировой практике в 20-50-х гг. прошлого века для получения генераторного газа. В последствии процесс был усовершенствован за счет использования кислорода, повышения давления, применения кипящего слоя и т.п. Все эти системы используют пар и воздух (или кислород) для окисления углерода. На сегодняшний день наиболее перспективным для промышленной газификации угля можно считать конструкцию высокотемпературного газификатора Винклера с кипящим слоем. Состав газа на его выходе такой установки содержит максимальную объемную долю водорода – до 35%. Тепло- и массообмен в кипящем слое даже при атмосферном давлении достаточно интенсивны. Это обеспечивает высокую степень окисления углерода топлива (до 90%). В газификаторе Винклера предусмотрено твердое шлакоудаление, что обуславливает сравнительно низкую температуру процесса (около 1000°C). Существуют проекты усовершенствования газификатора Винклера за счет повышения температуры и давления.

На рис. 8 показана схема производства газообразного водорода по методу газификации угля. По этой технологии удельный расход угля равен 7,0-7,5 кг/кг H₂; воды – 9 кг; электроэнергии – 0,7-0,8 кВтч. Выбросы CO₂ составляют 21,8 кг. Как видно, в процессе газификации угля выбросы CO₂ оказываются в 2,3 раза больше, чем при получении газообразного водорода по методу ПКМ.

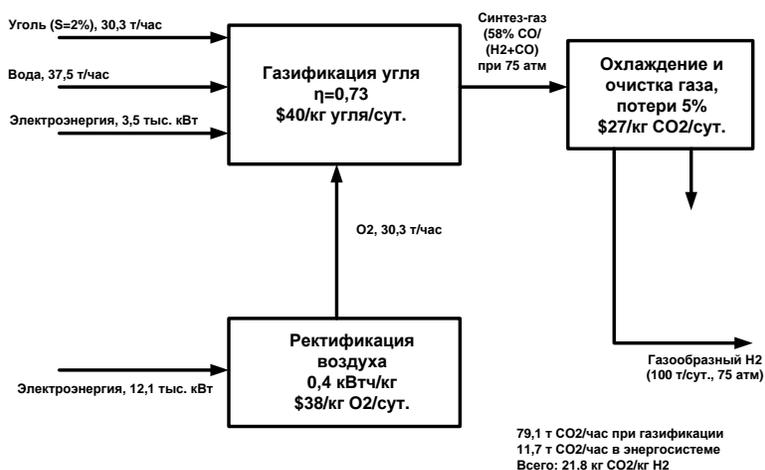


Рис. 8.Схема получения газообразного водорода путем газификации угля [21]

Газификация угля может оказаться экономически привлекательной в районах дешевого угля. Однако в этом способе выделяется много парниковых газов, что может оказаться малоперспективным с точки зрения

влияния на климат. Существующие методы улавливания CO_2 пока плохо разработаны, дороги и связаны с локальными условиями захоронения или использования CO_2 . В связи с неоднородностью состава углей часто требуется дальнейшая очистка водорода от примесей, недопустимых в установках электрохимического использования водорода, например, в топливных элементах. Дополнительная очистка водорода усложняет технологический процесс и сильно влияет на стоимостные показатели.

Электролиз воды. Водород может быть произведен электролизом воды на базе электроэнергии. Хотя этот способ имеет многолетнюю историю, тем не менее в настоящее время мировой объем производства водорода путем электролиза воды невелик причина этого кроется в относительно низкой суммарной эффективности процесса по сравнению с паровой конверсией метана и газификацией угля.

Важное потенциальное преимущество электролиза заключается в том, что его достаточно легко организовать в условиях маломасштабного производства, приблизив его к потребителям. Это позволяет отказаться от сооружения дорогостоящих систем распределения водорода. Электролизеры обеспечивают производство особо чистого водорода. К недостаткам электролиза относятся низкая суммарная энергетическая эффективность процесса и относительно высокие капитальные затраты. В настоящее время применяются и разрабатываются новые типы электролизеров, позволяющих увеличить эффективность и коммерческую привлекательность процесса электролиза (твердополимерные электролизеры, высокотемпературные и др.).

Наиболее широко используемая технология электролиза основана на применении щелочных электролитов. Усовершенствованные щелочные электролизеры могут быть использованы для крупномасштабного производства водорода из воды с суммарной эффективностью преобразования первичной энергии, равной 28-36% с учетом КПД электростанции на уровне 35-40% .

Широкие перспективы электролиза связаны с применением твердополимерных электролизеров (ТПЭ) с платиновыми катализаторами, обеспечивающих более высокий выход водорода и сокращение использования энергии. В последнее время ведутся разработки электролизеров с ТПЭ, не содержащих драгоценных металлов, хотя, несмотря на некоторые успехи в решении этой задачи для специальных электролизеров с малым ресурсом работы, приемлемого решения пока не найдено. ТПЭ электролизеры характеризуются значительно большими удельными капитальными затратами, чем щелочные, но эти затраты уменьшаются при переходе к большим объемам производства. ТПЭ

электролизеры имеют преимущества при эксплуатации, чем щелочные, и способны работать в обратном направлении, как топливные элементы для производства электричества из водорода.

Еще один тип электролизеров – высокотемпературные электролизеры, в которых электролиз водяного пара происходит при температурах 800-1000°C. Требования к электродным материалам при таких условиях очень высоки. В качестве источника электроэнергии для электролиза целесообразно рассматривать несколько вариантов: энергоснабжение от энергосистемы и выработка электроэнергии на месте на базе возобновляемых источников энергии, например солнечной или ветровой энергии.

На рис. 9 показана схема электролиза воды на электроэнергию от энергосистемы. Основные недостатки этого метода заключаются в количестве используемой энергии и сопутствующих выбросах парниковых газов при производстве электроэнергии. Однако ситуация может измениться в перспективе вследствие изменения структуры генерирующих мощностей в энергосистемах в сторону увеличения доли безуглеродных технологий (ядерной энергии и возобновляемых источников). Это позволяет надеяться на то, что электролиз воды станет экологически чистым процессом.

По данной технологии удельные расходы составляют: электроэнергии – 55-60 кВт·ч/кг H₂; воды – 9 кг. Выход кислорода равен 8 кг/кг H₂; выбросы CO₂ – 41,1 кг/кг H₂.

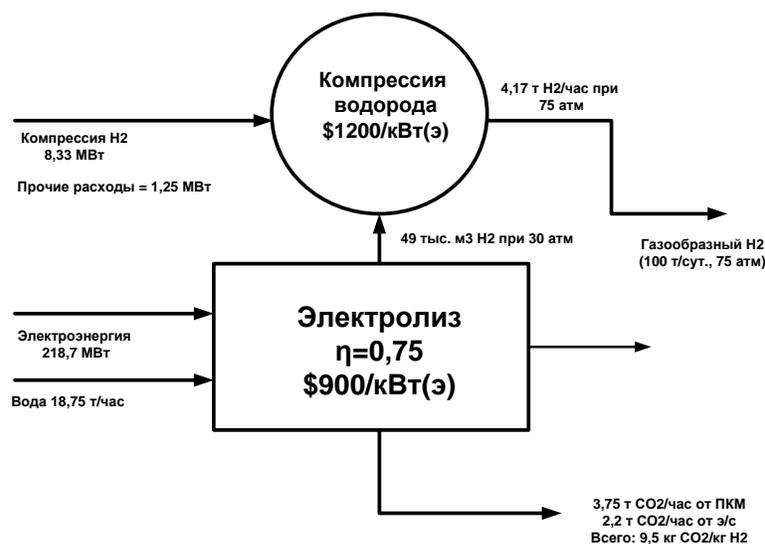


Рис. 9. Схема получения газообразного водорода электролизом воды при использовании электроэнергии от энергосистемы [21]

При получении электроэнергии от возобновляемых источников энергии могут использоваться солнечная и ветровая энергия. При

электролизе на базе солнечной энергии источником электроэнергии являются фотоэлектрические преобразователи (рис. 10). Стоимость электролизеров и солнечных батарей остается основной проблемой при выборе этой технологии.

Важными особенностями солнечной инсоляции как энергоисточника, являются относительно низкий поток энергии солнечного излучения в умеренных широтах (около нескольких сотен ватт на квадратный метр в условиях России) и большие суточные и сезонные колебания интенсивности излучения, что ведет к низкому значению коэффициента использования установленной мощности источника (не превышающие 20-40%) в средних широтах. Это обстоятельство является серьезным препятствием для использования солнечной энергии в производстве электроэнергии и соответственно водорода.

При использовании энергии солнечной (СЭС) и ветровой (ВЭС) электрических станций основные показатели технологий совпадают с аналогичными величинами модели на базе энергосистемы; выбросы же CO_2 отсутствуют.



Рис. 10. Схема получения газообразного водорода электролизом воды при использовании солнечной и ветровой энергии [21]

Энергия ветра уже активно используется для производства электроэнергии в ряде зарубежных стран (Дания, Германия, Великобритания). Это позволяет рассматривать ветровую энергию как перспективную базу для производства водорода. При использовании энергии ветра имеют место те же расходные характеристики, что и при получении водорода на базе солнечной энергии. Обе технологии применимы для производительности по водороду не более 10 т/сут., что соответствует мощности ВЭС или СЭС 20-25 МВт (э). Существуют и другие технологии получения водорода, например, путем биохимических реакций; пиролизом углеводородов, угля, древесины и

отходов; взаимодействия воды с металлами; биофотолизом воды и др. Однако все они еще далеки от промышленного освоения.

Термохимическое разложение воды при использовании высокотемпературного тепла ВТГР. Существует реальные возможности использования высокотемпературных газоохлаждаемых ядерных реакторов (ВТГР) для крупномасштабного производства водорода [62, 63]. Причем, их использование считается одним из перспективных способов энергообеспечения процессов получения водорода в перспективе. Это обусловлено, во-первых, возможностью подвода высокопотенциальной теплоты в энерготехнологических процессах производства водорода, во-вторых, возможностью обеспечения высокой суммарной термодинамической эффективности использования энергии первичного источника, в данном случае ядерного топлива и, в-третьих, практически полным исключением выбросов CO_2 в атмосферу.

На рис. 11 показана схема применения ВТГР для термохимического разложения воды. В основе термохимического производства водорода лежит йодно-серный процесс, состоящий из трех химических реакций, реагентом в которых выступает вода, а конечными продуктами водород и кислород. Две из трех реакций проходят при температуре 800-1000°C с поглощением теплоты, источником которой является ВТГР. Электроэнергия для остальных процессов (сжатие или сжижение водорода и др.) поступает от энергосистемы. Эффективность производства водорода в таком процессе может достигать 40-60%.

По этой технологии удельный расход теплоты достигает 60-65 кВтч (т)/кг H_2 ; воды – 9-20 кг; электроэнергии – 2,0-2,5 кВтч.

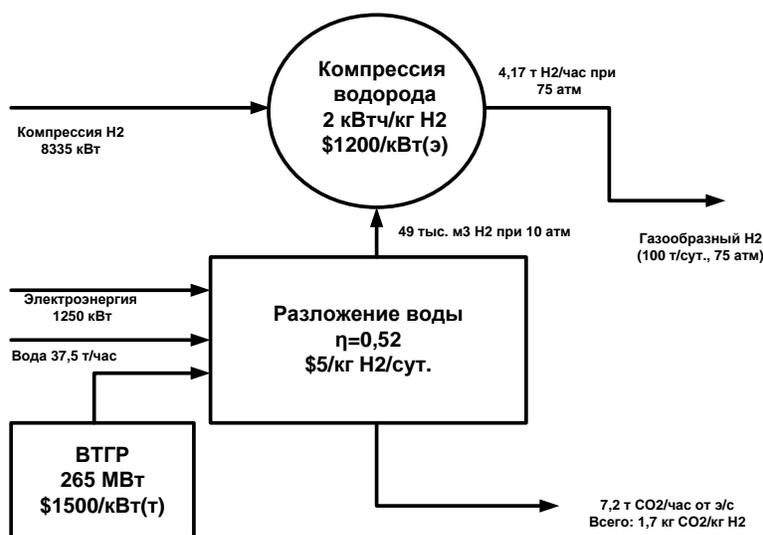


Рис. 11. Схема получения газообразного водорода путем термического разложения воды на базе ВТГР [21]

Серьезной проблемой на пути внедрения этой технологии может стать негативное отношение населения к использованию ядерной энергии. Тем не менее, как показано ниже, стоимость производства водорода на базе ядерной энергии может вполне конкурировать с другими методами. Правда, в этом случае приходится иметь дело с крупными установками, соответствующими единичной мощности ВТГР не менее 200-300 МВт (т). Это требует наличия достаточно обширного круга потребителей и развернутой инфраструктуры для доставки водорода.

По рассмотренным схемам получения водорода были рассчитаны стоимости водорода. В расчетах были использованы следующие стоимостные показатели основных элементов производственных схем (в ценах 2010-х годов) [63-65]:

- *электролизер* – \$900 /кВт (при децентрализованном производстве \$2400/кВт),
- *установка для риформинга метана* – \$35/кг H₂ (при децентрализованном производстве \$165/кг H₂),
- *водородный компрессор* – \$1200/кВт,
- *установка по сжижению H₂* – \$1350/кг H₂ /сут.,
- *хранение H₂ в сжатом виде* – \$100-200/кг H₂ (при децентрализованном производстве \$850/кг H₂), *хранение жидкого водорода* – \$25-50/кг H₂.

Для безуглеродных способов получения водорода были приняты следующие удельные капиталовложения:

- *ВТГР* [66] - \$1500/кВт (по тепловой мощности)
- *ВЭС* [67] – снижение стоимости установленной мощности с \$1500/кВт до \$1000/кВт к концу периода,
- *СЭС* [67] – соответственно, предполагается снижение стоимости солнечной электростанции с \$3000/кВт до \$1000/кВт (по электрической мощности).

Во всех вариантах учтены также дополнительные затраты для перехода к полным инвестициям (в % от суммарной стоимости основного оборудования): обеспечение энергией, водой и т.п. – 20%; проектирование, наладка оборудования и т.п. – 15% (при децентрализованном производстве 10%); непредвиденные расходы – 10%; оборотные средства, стоимость земли и др. - 7% (при децентрализованном производстве 9%). Срок службы объектов принят 20 лет. Прочие переменные затраты, кроме топлива и

энергии, составляют 1% в год от полных капиталовложений; постоянные эксплуатационные издержки - 5% в год. Рентабельность инвестиций принята в размере 10% в год.

Стоимость водорода сильно зависит от масштабов производства. Для оценки этого факторы в модели был включен масштабный фактор, позволяющий учесть возможные колебания производительности установок на стоимостные показатели технологии. Расчет масштабного фактора в первом приближении проведен по следующему выражению (закон Хендерсона [68]):

$$C_n = C_0 * (V_n / V_0)^{-a},$$

где V_0 – базовый объем производства, для которого известно значение затрат производимой единицы; V_n – объем производства, исследуемый в модели; C_0 – известное значение затрат производимой единицы при базовом объеме производства; C_n – искомое значение затрат производимой единицы при исследуемом объеме производства; a – эластичность затрат по отношению к выпуску продукции (принята равной 0,75 [69]).

Хранение больших объемов водорода. В силу своих физико-химических свойств проблемы транспортировки и хранения водорода приобретают особое значение. В нормальных условиях 1 кг водорода занимает объем 11 куб. м. В сравнении с бензином единица веса водорода имеет в 3 раза большее теплосодержание, но в единице объема – только одну четверть от бензина. Поэтому используют различные методы, чтобы уменьшить объем водорода. Это может быть достигнуто за счет повышения давления, перевода газообразного водорода в жидкую фазу, использования абсорбционных свойств некоторых металлов, применения специальных углеродных материалов для хранения водорода и др. В представленной работе рассматриваются два состояния товарного водорода: в сжиженном виде (при -253°C) и газообразном виде под давлением (до 800 атм.).

Хранение газообразного водорода производится в наземных или подземных хранилищах. В настоящее время сжатый водород обычно хранится в стандартных баллонах по 50 л или в сферических емкостях объемом 15 тыс. л и более при давлении около 200 атм. Существуют проекты хранения сжатого водорода в трубах. Однако из-за своей высокой стоимости объем хранения в трубчатых системах не превышает 14 тыс. м³. Стоимость наземных систем зависит от объема хранилища, применяемого давления и длительности хранения. Стоимость сооружения таких систем наземного хранения водорода составляет 200-1100 долл./кг H₂ для баллонного хранения или хранения в танках и около 2000 долл./кг H₂ для

хранения в трубчатых системах. Расход энергии на компрессию значителен и достигает 850-2150 кВтч/кг H_2 . В результате стоимость хранения оценивается в 0,2-0,5 долл./кг H_2 при сроке хранения в одни сутки и возрастает до 0,85-4,4 долл./кг H_2 для 30-дневного хранения.

Подземные хранилища компрессируемого водорода являются более предпочтительными при больших объемах и продолжительном хранении. Существует несколько крупных систем такого типа: под г. Kiel (Германия) находится хранилище водородосодержащего газа (60-65% H_2), работающее с 1971 г.; около г. Beunes (Франция) нефтезаводской газ, богатый водородом, хранится в водяных пластах; около г. Teeside (Великобритания) имеется хранилище водорода в соляном пласте. Капитальные затраты системы подземного хранения водорода оцениваются в 2-10 долл./кг H_2 . В целом дополнительные затраты на хранение водорода в подобных системах могут составлять от 0,15-0,6 долл./кг H_2 при односуточном хранении. Ожидается, что при 30-дневном хранении затраты увеличиваются на 50-80%. При больших объемах хранения следует иметь в виду образования большой «подушки» газа при снижении давления до атмосферного. Для вытеснения «подушки» используются соляные растворы, что увеличивает стоимость подземного хранения.

В системах хранения водорода в жидкой фазе используются специальные методы перевода газообразного водорода в жидкое состояние при температурах ниже $-253^{\circ}C$. Для этого водород сжимается, затем охлаждается и быстро расширяется, что приводит к резкому падению температуры и образованию жидкости. Крупнейшая система хранения жидкого водорода имеет емкость 3800 куб. м. Она находится в распоряжении НАСА (США). В связи с чрезвычайно низкими температурами большую проблему в таких системах представляет испарение жидкого водорода, которое достигает 2-3%/сут. в малых системах и 0,1%/сут. в крупных сферических сосудах. Скорость испарения зависит от поверхности сосуда, в котором хранится жидкий водород. Поэтому увеличение объема сосуда приводит к относительному снижению потерь водорода, так как объем растет быстрее роста площади поверхности. Размеры контейнеров для хранения жидкого водорода колеблются от 110 до 5300 кг.

Расход электроэнергии в таких системах является крупным элементом затрат по хранению. Он колеблется от 10 до 20 кВтч/кг H_2 , что при средних стоимостях электроэнергии составляет 60-80% годовых затрат при однодневном хранении более 1,5 тыс. кг H_2 и 30-70% при 30-дневном хранении в очень крупных системах хранения жидкого водорода более 12 т H_2 . В итоге стоимость хранения жидкого водорода в крупных системах будет

составлять около 0,6-1 долл./кг H₂, увеличиваясь до 2-2,8 долл./кг H₂ в системах малой мощности.

В результате хранение водорода в размере суточной производительности будет стоить около \$0,5/кг H₂ для газообразном водорода и на \$2,5/кг H₂ для жидкого водорода.

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 [70]. Поставки сжиженного водорода осуществляются в криогенных цистернах авто- или железнодорожным транспортом. Стоимость автомобильной криогенной системы достигает 350 тыс. долл. (22 куб. м).

Удельные капиталовложения в элементы технологий транспорта водорода приняты по [71,72]:

- *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.

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.) [73]. 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.

На основе сделанных допущений были получены значения отдельных элементов затрат при производстве водорода по различным технологиям в условиях крупно и среднемасштабного производств (табл. 23). По данным табл. 23 были рассчитаны ожидаемые значения стоимости получения 1 кг газообразного и сжиженного водорода при использовании различных источников сырья и электроэнергии с учетом прогнозов минимальных и максимальных оценок стоимости энергоносителей, приведенных в табл. 6 (рис. 12, 13 и 14).

Как видно из графиков, при централизованном производстве газообразного водорода технология на базе ПКМ оказывается наиболее выгодной на протяжении рассматриваемой перспективы (рис. 13). Несколько уступает этой технологии способ на базе газификации угля. Причем разрыв между газовой и угольной технологиями будет сокращаться в связи с относительно более медленным изменением цены угольного топлива. Тот же вывод справедлив и для сжиженного водорода (см. рис. 13). Следует отметить, что при получении сжиженного водорода необходимо считаться со значительным ростом эффективности технологий на базе возобновляемых источников энергии (ветровой и солнечной энергии), которые существенно увеличивают свою эффективность по мере снижения затрат на получение электроэнергии на возобновляемых источниках энергии.

При децентрализованном получении водорода метод ПКМ остается наиболее перспективным, хотя стоимость водорода будет несколько более высокой, чем при централизованном производстве и специализированном транспорте водорода до потребителей (рис. 14).

Таким образом, при централизованном производстве водорода его стоимость при рассмотренных выше допущениях может составить: газообразный водород 2-3 долл./кг H₂, а сжиженный – 5-6 долл./кг H₂.

При производстве водорода на базе локальных станций наиболее перспективным способом может считаться метод ПКМ, который способен обеспечить получение водорода со стоимостью около 4,5-5,5 долл./кг H₂. Даже в отдаленной перспективе децентрализованное получение водорода на базе возобновляемых источников энергии будет оставаться практически в два раза более дорогим по сравнению с паровой конверсией метана.

Таблица 23. Оценка технико-экономических показателей централизованного производства водорода при мощностях в диапазоне 10-100 т/сут.

| Технологии получения H ₂ | Расход энергоресурсов на 1 кг H ₂ | | Переменные издержки (без энергоресурсов), долл./кг H ₂ | Постоянные издержки (без амортизации), долл./кг H ₂ | Удельные капиталовложения, тыс. долл./т H ₂ |
|--|--|--|---|--|--|
| | основной | электро-энергия для вспомогательных нужд | | | |
| Паровая конверсия метана | природный газ 5,5-6,5 куб. м | <u>0,7-0,8</u> 10-12 | <u>0,09-0,11</u> 1,29-1,32 | <u>0,08-0,15</u> 0,38-0,54 | <u>1,7-3,3</u> 8,5-12 |
| Газификация угля | уголь 5-7 кг у.т. | <u>3,7-3,9</u> 14-17 | <u>0,45-0,50</u> 1,72-1,77 | <u>0,28-0,46</u> 0,6-0,9 | <u>6,2-10,2</u> 13,6-20 |
| Термохимическое разложение воды на базе ВТГР | - | <u>2,2-2,5</u> 12-15 | <u>0,39-0,45</u> 2,16-2,40 | <u>3,7-4,5</u> 4,6-5,0 | <u>30-36</u> 36,8-43 |
| Электролиз от энергосистемы | электроэнергия 50-52 | <u>2-2,5</u> 12-15 | <u>0,04-0,06</u> 0,07-0,11 | <u>0,6-0,8</u> 0,8-1,0 | <u>10-13</u> 17-21 |
| от ВЭС | электроэнергия 50-52 | <u>2-2,5</u> 12-15 | <u>0,29-0,40</u> 0,4-0,55 | <u>1,85-2,4</u> 2,4-3,0 | <u>41-52</u> 53-67 |
| от СЭС | электроэнергия | <u>2-2,5</u> 12-15 | <u>0,23-0,30</u> 0,32-0,42 | <u>1,5-1,9</u> 2,0-2,5 | <u>34-42</u> 44-55 |

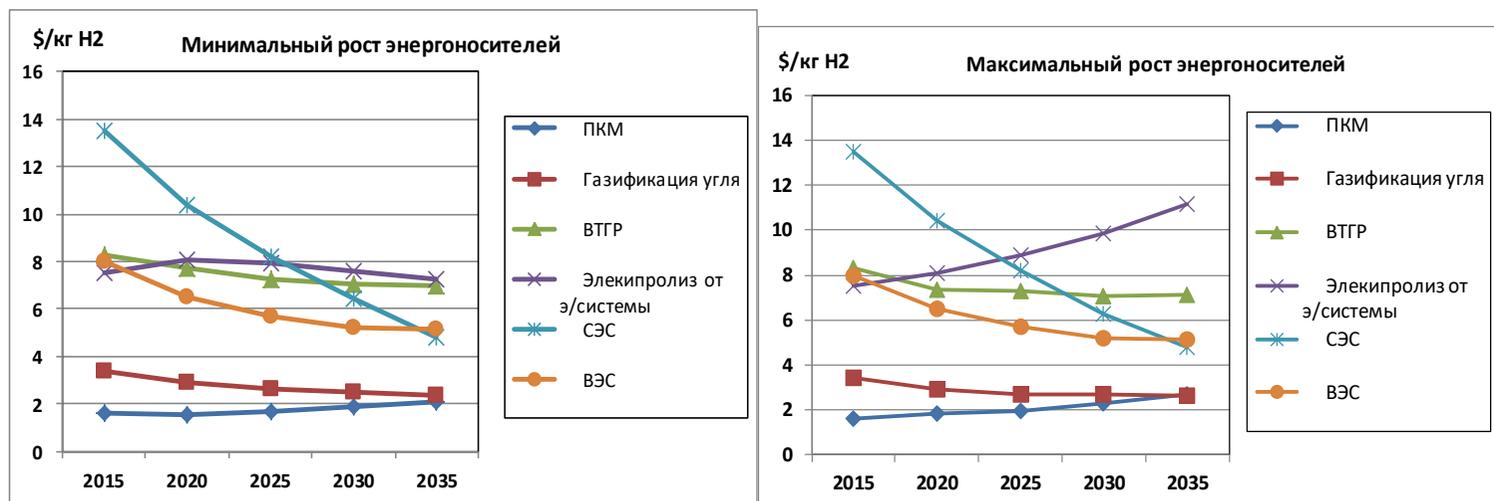


Рис. 13. Прогнозы стоимости *централизованного получения газообразного водорода* при двух сценарных гипотезах динамики стоимости энергоносителей

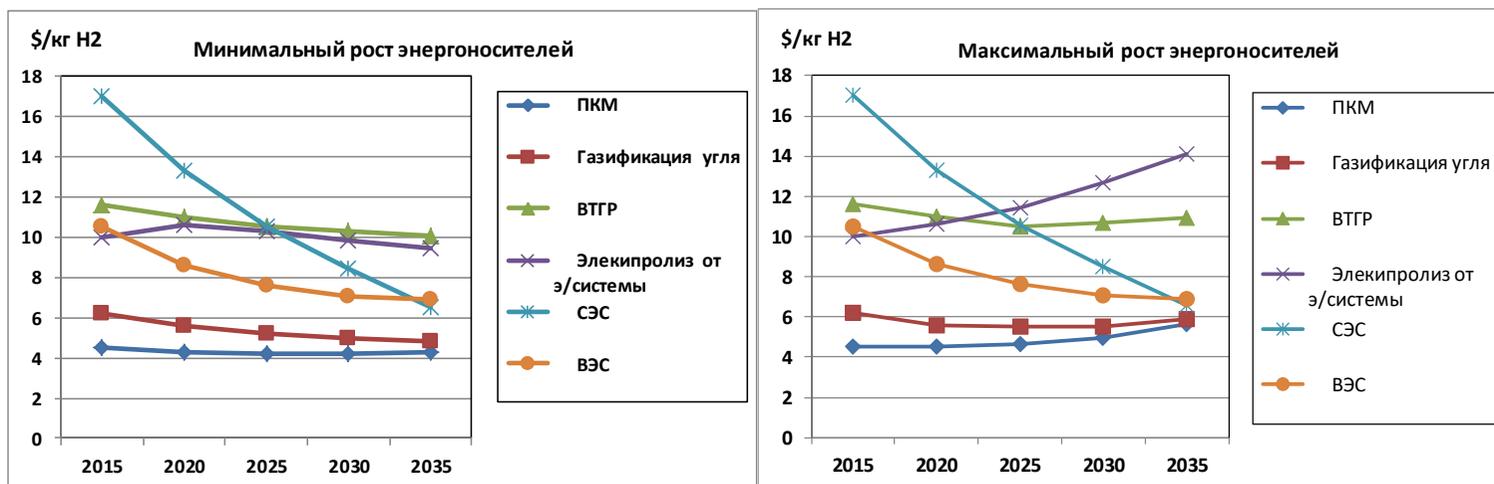


Рис. 14. Прогнозы стоимости *централизованного получения жидкого водорода* при двух сценарных гипотезах динамики стоимости энергоносителей

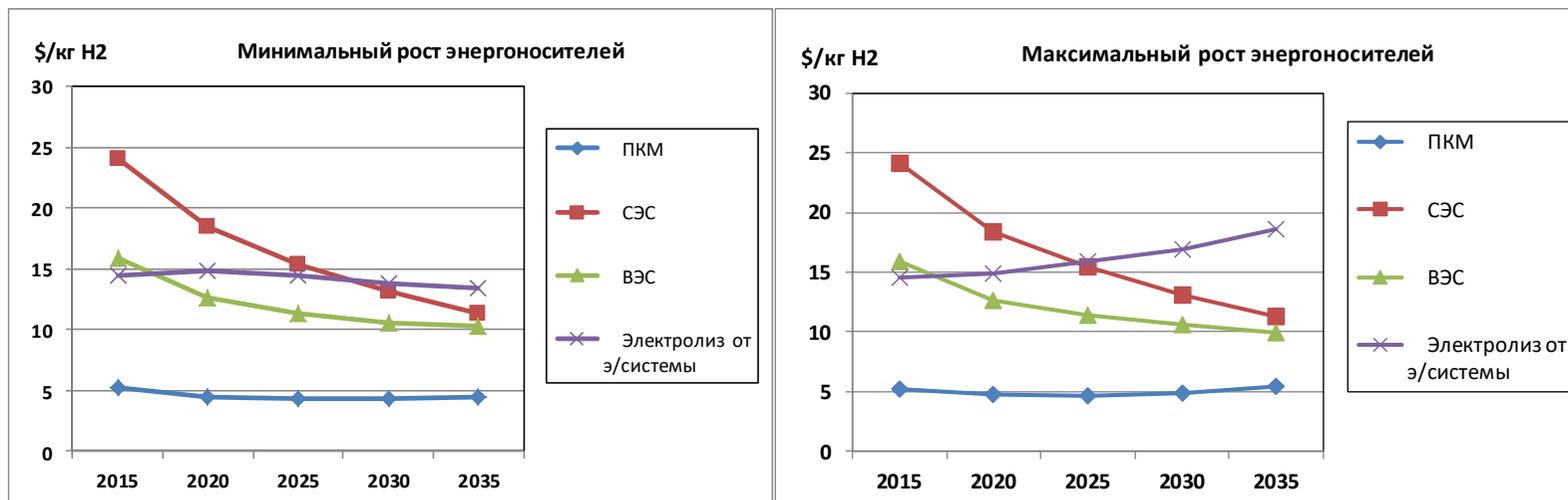


Рис. 15. Прогнозы стоимости *газообразного водорода* при децентрализованном производстве

4.3.4. Ожидаемые сокращения выбросов и ущербов от загрязнения окружающей среды для водородного автомобиля с ТЭ

Для автомобиля с ТЭ были рассчитаны ожидаемые выбросы в окружающую среду при годовом пробеге 20 тыс. км (табл. 24 и 25). Как и в предыдущих случаях, выбросы включают полный цикл, связанный с эксплуатацией автомобиля – топливный цикл (от скважины до заправочной станции), использование автомобиля в городской и загородной среде (от емкости до колеса), а также при производстве автомобиля. Для расчетов была использована модель GREET (см. выше).

Таблица 24. Расчетная оценка годовых выбросов в окружающую среду по полному циклу автомобиля с ТЭ в 2015 г., кг/год

| Тип автомобиля / выбросы | GHGs | VOC | CO | NOx | PM10 | PM2.5 | SOx |
|---|--------|-----|-----|-----|------|-------|------|
| Авто с ТЭ на газообразном водороде | | | | | | | |
| Производство авто | 1109,5 | 3,3 | 5,3 | 1,6 | 1,7 | 0,7 | 4,6 |
| Эксплуатация городской цикл | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,1 | 0,0 |
| Эксплуатация загородный цикл | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| Топливный цикл | | | | | | | |
| <i>Централизованное производство H2</i> | | | | | | | |
| ПКМ (природный газ) | 2359,7 | 0,3 | 0,7 | 2,7 | 0,8 | 0,4 | 1,5 |
| Газификация угля | 3884,1 | 0,3 | 0,3 | 1,0 | 5,6 | 1,4 | 1,4 |
| Термохимическое разложение с ВТГР | 487,6 | 0,0 | 0,2 | 0,8 | 0,6 | 0,2 | 1,1 |
| Электролиз от энергосистемы | 6718,1 | 0,6 | 1,8 | 7,5 | 8,5 | 2,3 | 15,2 |
| Электролиз ВЭС, СЭС | | | | | | | |
| <i>Децентрализованное производство H2</i> | | | | | | | |
| ПКМ (природный газ) | 2122,6 | 0,2 | 0,5 | 1,3 | 0,7 | 0,4 | 1,1 |
| Электролиз от энергосистемы | 6316,7 | 0,5 | 1,7 | 6,8 | 8,0 | 2,1 | 14,3 |
| Электролиз СЭС | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Авто с ТЭ на сжиженном водороде | | | | | | | |
| Производство авто | 1109,5 | 3,3 | 5,3 | 1,6 | 1,7 | 0,7 | 4,6 |
| Эксплуатация городской цикл | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,1 | 0,0 |
| Эксплуатация | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |

| | | | | | | | |
|--|--------|-----|-----|------|------|-----|------|
| загородный цикл | | | | | | | |
| Топливный цикл | | | | | | | |
| <i>Централизованное пр-во</i> | | | | | | | |
| ПКМ (природный газ) | 3539,1 | 0,3 | 1,0 | 4,0 | 2,5 | 0,9 | 4,6 |
| Газификация угля | 5275,6 | 0,4 | 0,7 | 2,3 | 7,3 | 1,9 | 4,5 |
| Термохимическое разложение воды с ВТГР | 1872,2 | 0,2 | 0,5 | 2,2 | 2,3 | 0,6 | 4,2 |
| Электролиз от энергосистемы | 9874,1 | 0,8 | 2,7 | 10,8 | 12,5 | 3,3 | 22,3 |
| Электролиз ВЭС, СЭС | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Таблица 25. Расчетная оценка годовых выбросов в окружающую среду по полному циклу автомобиля с ТЭ в 2015 г., кг/год

| Тип автомобиля / выбросы | GHGs | VOC | CO | NOx | PM10 | PM2.5 | SOx |
|---|-------------|------------|-----------|------------|-------------|--------------|------------|
| Авто с ТЭ на газообразном водороде | | | | | | | |
| Производство авто | 1109,5 | 3,3 | 5,3 | 1,6 | 1,7 | 0,7 | 4,6 |
| Эксплуатация городской цикл | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,1 | 0,0 |
| Эксплуатация загородный цикл | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| Топливный цикл | | | | | | | |
| <i>Централизованное производство H2</i> | | | | | | | |
| ПКМ (природный газ) | 2359,7 | 0,3 | 0,7 | 2,7 | 0,8 | 0,4 | 1,5 |
| Газификация угля | 3884,1 | 0,3 | 0,3 | 1,0 | 5,6 | 1,4 | 1,4 |
| Термохимическое разложение воды с ВТГР | 487,6 | 0,0 | 0,2 | 0,8 | 0,6 | 0,2 | 1,1 |
| Электролиз от энергосистемы | 6718,1 | 0,6 | 1,8 | 7,5 | 8,5 | 2,3 | 15,2 |
| Электролиз ВЭС, СЭС | | | | | | | |
| <i>Децентрализованное производство H2</i> | | | | | | | |
| ПКМ (природный газ) | 2122,6 | 0,2 | 0,5 | 1,3 | 0,7 | 0,4 | 1,1 |
| Электролиз от энергосистемы | 6316,7 | 0,5 | 1,7 | 6,8 | 8,0 | 2,1 | 14,3 |
| Электролиз ВЭС, СЭС | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Авто с ТЭ на сжиженном водороде | | | | | | | |
| Производство авто | 1109,5 | 3,3 | 5,3 | 1,6 | 1,7 | 0,7 | 4,6 |
| Эксплуатация городской цикл | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,1 | 0,0 |

| | | | | | | | |
|--|--------|-----|-----|------|------|-----|------|
| Эксплуатация загородный цикл | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| Топливный цикл | | | | | | | |
| <i>Централизованное производство H₂</i> | | | | | | | |
| ПКМ (природный газ) | 3539,1 | 0,3 | 1,0 | 4,0 | 2,5 | 0,9 | 4,6 |
| Газификация угля | 5275,6 | 0,4 | 0,7 | 2,3 | 7,3 | 1,9 | 4,5 |
| Термохимическое разложение воды с ВТГР | 1872,2 | 0,2 | 0,5 | 2,2 | 2,3 | 0,6 | 4,2 |
| Электролиз от энергосистемы | 9874,1 | 0,8 | 2,7 | 10,8 | 12,5 | 3,3 | 22,3 |
| Электролиз ВЭС, СЭС | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

В табл. 26 и 27 показаны ожидаемые стоимостные ущербы от загрязнения окружающей среды в 2015 и 2035 гг., определенные по данным о годовых выбросах (табл. 21 и 22) и удельным ущербам (табл. 4 и 5). Ущерб по выбросам парниковых газов даются для трех вариантов учета воздействия этой категории выбросов на здоровье людей и окружающую среду (см. раздел 3.4).

Как следует из расчетов, наибольший ущерб наблюдается в схемах с электролизом от энергосистемы, наименьший – при выработке электроэнергии на возобновляемых источниках энергии. При этом сильное влияние на результат оказывает способ оценки ущербов от выбросов тепличных газов (последствия изменение климата). Так, получение газообразного водорода при централизованном производстве электролизом от энергосистемы суммарный ущерб в 2015 г. оценивается величиной от 510 до 1013 долл./год. Из этой величины 33-52% ущерба происходит на стадии производства автомобиля, 43-65% в топливном цикле и только 3-6% непосредственно в процессе эксплуатации автомобиля. В минимальном случае суммарный при электролизе за счет электроэнергии, вырабатываемой на ВЭС или СЭС суммарный эффект едва достигает 300-370 долл./год, из которых 89-91% приходится на производства автомобиля и 9-11% в процессе его эксплуатации.

4.3.5. Расчет стоимости эксплуатации водородного автомобиля с ТЭ

На рис. 15 приведены результаты расчетов стоимости эксплуатации автомобиля с ТЭ при различных способах и условиях получения водорода в 2015 и 2035 гг.

При принятых соображениях относительно перспектив роста цен традиционных энергоносителей и снижения стоимости альтернативных технологий можно ожидать, что к 2035 г. стоимость пробега 100 км на автомобиле с ТЭ может снизиться до 25-30 долл. При этом в число явных конкурентов попадают, кроме ПКМ и газификации угля, получение водорода

на базе солнечной и ветровой энергии. Как следует из расчетов, в настоящее время при централизованном производстве минимальные затраты имеет водород, полученный при минимальных ценах на энергоносители по технологии ПКМ (36-37 долл./100 км), а максимальные – полученный методом электролиза от энергосистемы (46-49 долл./100 км). При децентрализованном производстве стоимость водорода за счет низких экологических затрат составляет 26-28

Таблица 26. Расчетные значения компонентов полной стоимости ущерба для окружающей среды от водородного автомобиля с ТЭ в 2015 г. при минимальных и максимальных оценках ущерба, долл./год*

| Тип автомобиля / выбросы | GHGs (1)** | GHGs (3)** | VOC | CO | NOx | PM10 | PM2.5 | SOx | Итого (1)** | Итого (3)** |
|---|---------------|---------------|------|------|-------|-------|-------|--------|----------------|----------------|
| Авто с ТЭ на газообразном водороде | | | | | | | | | | |
| <i>Производство авто</i> | 18,86 | 88,76 | 4,58 | 0,74 | 24,21 | 6,59 | 31,36 | 180,57 | 266,91 | 336,81 |
| <i>Эксплуатация городской цикл</i> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 6,74 | 28,63 | 0,00 | 35,37 | 32,84 |
| <i>Эксплуатация загородный цикл</i> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,15 | 0,00 | 0,19 | 0,22 |
| <i>Топливный цикл</i> | | | | | | | | | | |
| <i>Централизованное производство H2</i> | | | | | | | | | | |
| ПКМ (природный газ) | 40,12 | 99,11 | 0,05 | 0,01 | 5,19 | 0,37 | 2,18 | 7,19 | 55,10 | 203,77 |
| Газификация угля | 66,03 | 163,13 | 0,05 | 0,01 | 1,85 | 2,62 | 7,90 | 6,77 | 85,23 | 329,93 |
| Термохимическое разложение с ВТГР | 8,29 | 20,48 | 0,01 | 0,00 | 1,50 | 0,28 | 0,91 | 5,35 | 16,34 | 47,06 |
| Электролиз от энергосистемы | 114,21 | 282,16 | 0,10 | 0,03 | 14,36 | 4,01 | 12,74 | 74,57 | 220,02 | 643,26 |
| Электролиз ВЭС, СЭС | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0 |
| <i>Децентрализованное производство H2</i> | | | | | | | | | | |
| ПКМ (природный газ) | 36,08 | 89,15 | 0,04 | 0,01 | 2,53 | 0,33 | 1,99 | 5,50 | 46,48 | 180,21 |
| Электролиз от энергосистемы | 107,38 | 265,30 | 0,09 | 0,03 | 13,14 | 3,78 | 11,99 | 70,08 | 206,49 | 604,44 |
| Электролиз ВЭС, СЭС | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0 |
| Итого, включая все три стадии | | | | | | | | | | |
| <i>Централизованное производство H2</i> | | | | | | | | | | |
| <i>ПКМ (природный газ)</i> | 58,98 | 277,54 | 4,63 | 0,75 | 29,4 | 13,26 | 60,3 | 187,76 | 355,08 | 573,64 |
| <i>Газификация угля</i> | 84,89 | 399,49 | 4,63 | 0,75 | 26,06 | 15,51 | 66,02 | 187,34 | 385,2 | 699,8 |
| <i>Термохимическое разложение воды с ВТГР</i> | 27,15 | 127,77 | 4,59 | 0,74 | 25,71 | 13,17 | 59,03 | 185,92 | 316,31 | 416,93 |
| <i>Электролиз от энергосистемы</i> | 133,07 | 626,21 | 4,68 | 0,77 | 38,57 | 16,9 | 70,86 | 255,14 | 519,99 | 1013,13 |

| | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|------|------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|
| <i>Электролиз ВЭС, СЭС</i> | 18,86 | 88,76 | 4,58 | 0,74 | 24,21 | 12,89 | 58,12 | 180,57 | 299,97 | 369,87 |
| <i>Децентрализованное производство H2</i> | | | | | | | | | | |
| <i>ПКМ (природный газ)</i> | 84,89 | 258,57 | 4,62 | 0,75 | 26,74 | 13,23 | 60,10 | 186,07 | 376,399 | 550,079 |
| <i>Электролиз от сети</i> | 133,07 | 594,09 | 4,67 | 0,77 | 37,35 | 16,68 | 70,10 | 250,64 | 513,288 | 974,308 |
| <i>Электролиз ВЭС, СЭС</i> | 27,15 | 88,76 | 4,58 | 0,74 | 24,21 | 12,90 | 58,12 | 180,57 | 308,265 | 369,875 |
| Авто с ТЭ на сжиженном водороде | | | | | | | | | | |
| <i>Производство авто</i> | 18,86 | 88,76 | 4,58 | 0,74 | 24,21 | 6,59 | 31,36 | 180,57 | 266,91 | 336,81 |
| <i>Эксплуатация городской цикл</i> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 6,74 | 28,63 | 0,00 | 35,37 | 32,84 |
| <i>Эксплуатация загородный цикл</i> | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,15 | 0,00 | 0,19 | 0,22 |
| <i>Топливный цикл</i> | | | | | | | | | | |
| <i>Централизованное производство H2</i> | | | | | | | | | | |
| ПКМ (природный газ) | 60,16 | 283,12 | 0,06 | 0,02 | 7,70 | 1,20 | 4,80 | 22,40 | 96,34 | 319,3 |
| Газификация угля | 89,69 | 422,05 | 0,07 | 0,01 | 4,52 | 3,46 | 10,54 | 22,02 | 130,31 | 462,67 |
| Термохимическое разложение воды с ВТГР | 31,83 | 149,77 | 0,03 | 0,01 | 4,17 | 1,11 | 3,53 | 20,60 | 61,28 | 179,22 |
| Электролиз от энергосистемы | 167,86 | 789,93 | 0,15 | 0,05 | 20,72 | 5,90 | 18,73 | 109,47 | 322,88 | 944,95 |
| Электролиз ВЭС, СЭС | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0 | 0 |
| Итого, включая все три стадии | | | | | | | | | | |
| <i>Централизованное производство H2</i> | | | | | | | | | | |
| ПКМ (природный газ) | 79,02 | 371,88 | 4,64 | 0,76 | 31,91 | 14,57 | 63,14 | 202,97 | 396,31 | 689,17 |
| Газификация угля | 108,55 | 510,81 | 4,65 | 0,75 | 28,73 | 16,83 | 68,88 | 202,59 | 430,28 | 832,54 |
| Термохимическое разложение с ВТГР | 50,69 | 238,53 | 4,61 | 0,75 | 28,38 | 14,48 | 61,87 | 201,17 | 361,25 | 549,09 |
| Электролиз сеть | 186,72 | 878,69 | 4,73 | 0,79 | 44,93 | 19,27 | 77,07 | 290,04 | 622,85 | 1314,82 |
| Электролиз ВЭС, СЭС | 18,86 | 88,76 | 4,58 | 0,74 | 24,21 | 13,37 | 58,34 | 180,57 | 299,97 | 369,87 |

* При минимальных значениях стоимости энергоносителей (см. табл. 6).

** (1) – минимальная оценка ущербов от выбросов CO₂, (3) – максимальная оценка (см. табл.8).

Таблица 27. Расчетные значения компонентов полной стоимости ущербов для водородного автомобиля с ТЭ в 2035 г. при минимальных и максимальных оценках ущерба, долл./год*

| Тип автомобиля / выбросы | GHGs (1) | GHGs (3) | VOC | CO | NOx | PM10 | PM2.5 | SOx | Итого (1) | Итого (3) |
|---|----------|----------|------|------|-------|-------|-------|--------|-----------|-----------|
| Авто с ТЭ на газообразном водороде | | | | | | | | | | |
| Производство авто | 34,40 | 183,07 | 4,58 | 0,74 | 24,21 | 6,59 | 31,36 | 180,57 | 282,45 | 431,12 |
| Эксплуатация городской цикл | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 6,74 | 28,63 | 0,00 | 35,37 | 32,84 |
| Эксплуатация загородный цикл | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,15 | 0,00 | 0,19 | 0,22 |
| Топливный цикл | | | | | | | | | | |
| Централизованное производство H2 | | | | | | | | | | |
| ПКМ (природный газ) | 73,15 | 389,36 | 0,05 | 0,01 | 5,19 | 0,37 | 2,18 | 7,19 | 88,14 | 404,34 |
| Газификация угля | 120,41 | 640,88 | 0,05 | 0,01 | 1,85 | 2,62 | 7,90 | 6,77 | 139,60 | 660,07 |
| Термохимическое разложение воды с ВТГР | 15,12 | 80,45 | 0,01 | 0,00 | 1,50 | 0,28 | 0,91 | 5,35 | 23,17 | 88,50 |
| Электролиз от энергосистемы | 208,26 | 1108,49 | 0,10 | 0,03 | 14,36 | 4,01 | 12,74 | 74,57 | 314,07 | 1214,30 |
| Электролиз ВЭС, СЭС | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Децентрализованное производство H2 | | | | | | | | | | |
| ПКМ (природный газ) | 65,80 | 350,23 | 0,04 | 0,01 | 2,53 | 0,33 | 1,99 | 5,50 | 76,19 | 360,62 |
| Электролиз от энергосистемы | 195,82 | 1042,25 | 0,09 | 0,03 | 13,14 | 3,78 | 11,99 | 70,08 | 294,92 | 1141,35 |
| Электролиз ВЭС, СЭС | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Итого, включая все три стадии | | | | | | | | | | |
| Централизованное производство H2 | | | | | | | | | | |
| ПКМ (природный газ) | 107,55 | 572,43 | 4,62 | 0,76 | 29,41 | 13,74 | 60,52 | 187,75 | 403,65 | 868,53 |
| Газификация угля | 154,80 | 823,95 | 4,63 | 0,75 | 26,06 | 16 | 66,24 | 187,34 | 455,11 | 1124,26 |
| Термохимическое разложение воды с ВТГР | 49,51 | 263,52 | 4,59 | 0,75 | 25,71 | 13,66 | 59,24 | 185,92 | 338,68 | 552,69 |
| Электролиз от энергосистемы | 242,66 | 1291,56 | 4,68 | 0,78 | 38,57 | 17,39 | 71,07 | 255,13 | 629,58 | 1678,48 |
| Электролиз ВЭС, СЭС | 34,40 | 183,07 | 4,58 | 0,74 | 24,21 | 13,38 | 58,34 | 180,57 | 315,51 | 464,19 |
| Децентрализованное производство H2 | | | | | | | | | | |
| ПКМ (природный газ) | 100,20 | 533,30 | 4,62 | 0,75 | 26,74 | 13,71 | 60,32 | 186,07 | 391,70 | 824,81 |

| | | | | | | | | | | |
|---|--------|---------|------|------|-------|-------|-------|--------|--------|---------|
| Электролиз от энергосистемы | 230,21 | 1225,32 | 4,67 | 0,77 | 37,35 | 17,16 | 70,32 | 250,64 | 610,43 | 1605,54 |
| Электролиз ВЭС, СЭС | 34,40 | 183,07 | 4,58 | 0,74 | 24,21 | 13,38 | 58,34 | 180,57 | 315,51 | 464,19 |
| Авто с ТЭ на сжиженном водороде | | | | | | | | | | |
| Производство авто | 34,40 | 183,07 | 4,58 | 0,74 | 24,21 | 6,59 | 31,36 | 180,57 | 282,45 | 431,12 |
| Эксплуатация городской цикл | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 6,74 | 28,63 | 0,00 | 35,37 | 32,84 |
| Эксплуатация загородный цикл | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,15 | 0,00 | 0,19 | 0,22 |
| Топливный цикл | | | | | | | | | | |
| <i>Централизованное производство H2</i> | | | | | | | | | | |
| ПКМ (природный газ) | 109,71 | 583,94 | 0,06 | 0,02 | 7,70 | 1,20 | 4,80 | 22,40 | 145,89 | 620,13 |
| Газификация угля | 163,54 | 870,48 | 0,07 | 0,01 | 4,52 | 3,46 | 10,54 | 22,02 | 204,17 | 911,10 |
| Термохимическое разложение воды с ВТГР | 58,04 | 308,91 | 0,03 | 0,01 | 4,17 | 1,11 | 3,53 | 20,60 | 87,50 | 338,37 |
| Электролиз от энергосистемы | 306,10 | 1629,23 | 0,15 | 0,05 | 20,72 | 5,90 | 18,73 | 109,47 | 461,10 | 1784,23 |
| Электролиз ВЭС, СЭС | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Итого, включая все три стадии | | | | | | | | | | |
| <i>Централизованное производство H2</i> | | | | | | | | | | |
| ПКМ (природный газ) | 144,11 | 767,02 | 4,64 | 0,76 | 31,92 | 14,58 | 63,14 | 202,97 | 461,41 | 1084,31 |
| Газификация угля | 197,94 | 1053,55 | 4,65 | 0,76 | 28,74 | 16,83 | 68,88 | 202,59 | 519,68 | 1375,29 |
| Термохимическое разложение воды с ВТГР | 92,43 | 491,98 | 4,61 | 0,75 | 28,39 | 14,49 | 61,87 | 201,17 | 403,01 | 802,55 |
| Электролиз от энергосистемы | 340,49 | 1812,30 | 4,72 | 0,79 | 44,93 | 19,28 | 77,06 | 290,03 | 776,61 | 2248,42 |
| Электролиз ВЭС, СЭС | 34,40 | 183,07 | 4,58 | 0,74 | 24,21 | 13,38 | 58,34 | 180,57 | 315,51 | 464,19 |

* При минимальных значениях стоимости энергоносителей (см. табл. 6).

** (1) – минимальная оценка ущербов от выбросов CO₂, (3) – максимальная оценка (см. табл.8).

долл./100 км. К 2035 г. стоимость водорода несколько снижается, хотя соотношение в технологиях сохраняется. При этом стоимость водорода по технологии ПКМ снижается до 24-26 долл./100 км, а стоимость самого дорогого водорода централизованного производства по методу электролиза снижается также (до 35-40 долл./100 км), оставаясь наиболее дорогим методом.

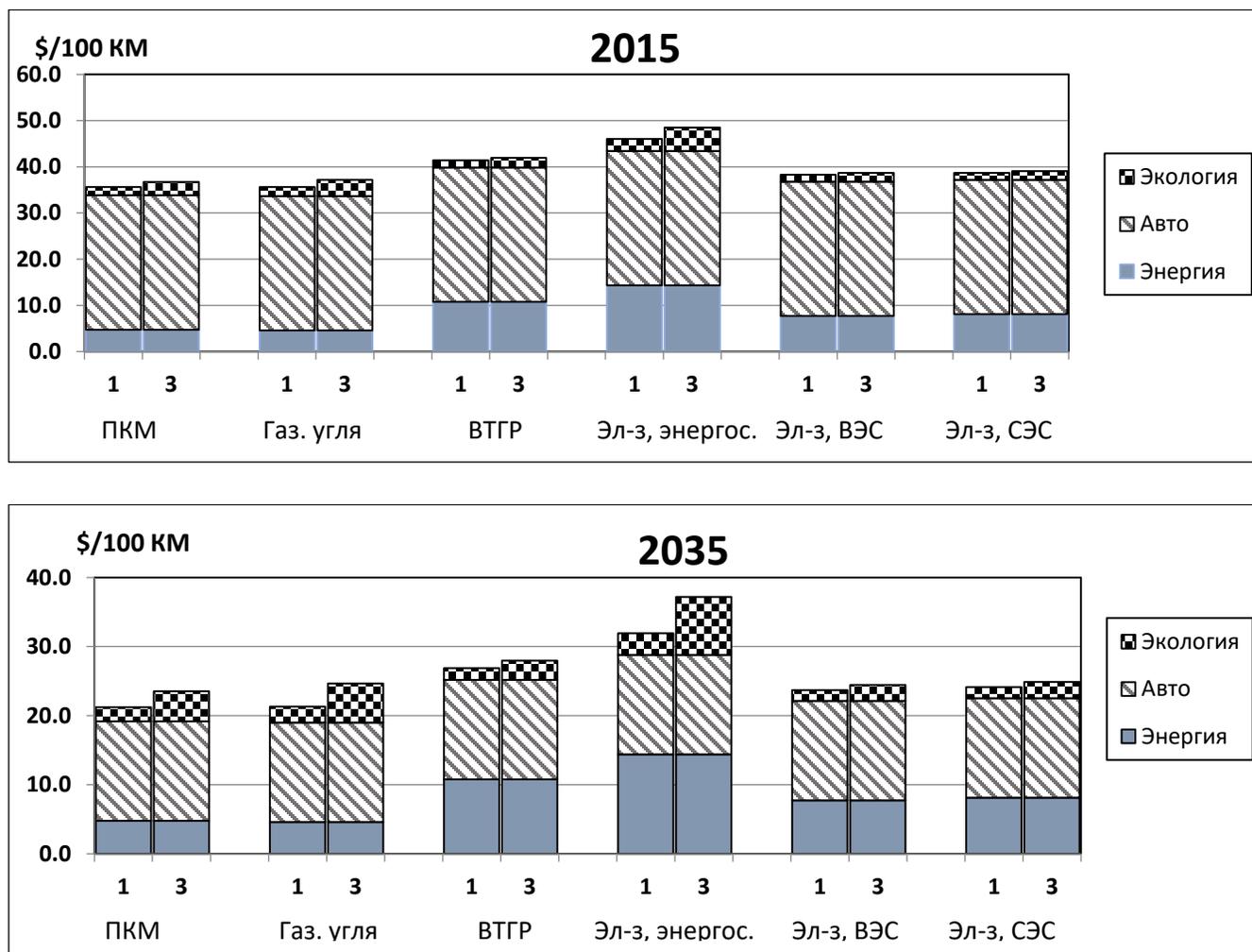


Рис. 15. Оценка стоимости эксплуатации автомобиля с ТЭ компактного класса на газообразном водороде в 2015 и 2035 г. при различных способах получения водорода и минимальных ценах на энергоносители долл./100 км (1 и 3 – минимальные и максимальные оценки экологического ущерба от выбросов CO₂)

Такие же соотношения наблюдаются при децентрализованном производстве газообразного водорода, хотя в этом случае пробег будет обходиться на 4-5 долл./100 км дороже, чем при централизации получения водорода.

Что касается сжиженного водорода, то на фоне больших трудностей с обеспечением надежного и безопасного хранения сжиженного водорода на борту автомобиля это направление пока вряд ли способна будет представлять реальный интерес для рынка в течение двух-трех десятилетий. К тому же, стоимость этой технологии оказывается заметно более высокой, чем при газообразном водороде (рис. 15).

5. Сопоставление экономичности использования традиционных и альтернативных топлив и технологий в легковом автотранспорте

Анализ результатов оценки экономической эффективности традиционных и альтернативных технологий в автотранспорте показывает, что в настоящее время стоимость эксплуатации традиционных автомобилей с ДВС в лучшем случае на 50-60% ниже, чем самых перспективных новых технологий. При этом затраты на энергоносители в электромобиле и в авто с ТЭ на водороде из природного газа уже сегодня на 35-50% ниже, чем в традиционных технологиях. Экологическая составляющая в затратах по новым технологиям также ниже и достигает 5-7% по сравнению с 8-15% в авто с ДВС. Однако, высокая стоимость самих автомобилей делает новые технологии пока неконкурентоспособными (рис. 16).

По мере совершенствования альтернативных технологий, изменений стоимости энергоносителей и увеличении ущербов от выбросов загрязнителей в окружающую среду новые технологии становятся более привлекательными. Практически к середине 30-х годов можно ожидать, что экономическая эффективность электромобилей и авто с ТЭ на водороде из природного газа станут на 2-3 долл./100 км дешевле по сравнению традиционными автомобилями на ДВС (рис. 17). Окончательный вывод будет, конечно, определяться локальными условиями эксплуатации транспортных средств и ситуацией на рынках альтернативных технологий.

Кроме того, альтернативные технологии обеспечивают существенное сокращение выбросов CO₂ (основного фактора воздействия на климат). Так, в 2035 г., по нашим расчетам, традиционные авто с ДВС на бензине будут иметь выбросы CO₂ в размере 3745 кг CO₂/год, а при дизельном топливе – 5120 кг CO₂. В то же время электромобиль имеет выбросы CO₂ только в топливном цикле (добыча топлива и получение электроэнергии) и при производстве транспортного средства, которые составляют в сумме 2810 кг CO₂/год. Несколько выше будут выбросы при использовании авто с ТЭ на газообразном водороде: 3470 кг CO₂/год при получении водорода по методу ПКМ, около 5000 кг CO₂ при использовании

газификации угля. Не исключено, что фактор выбросов углерода может стать решающим при выборе инновационных технологий в перспективе.

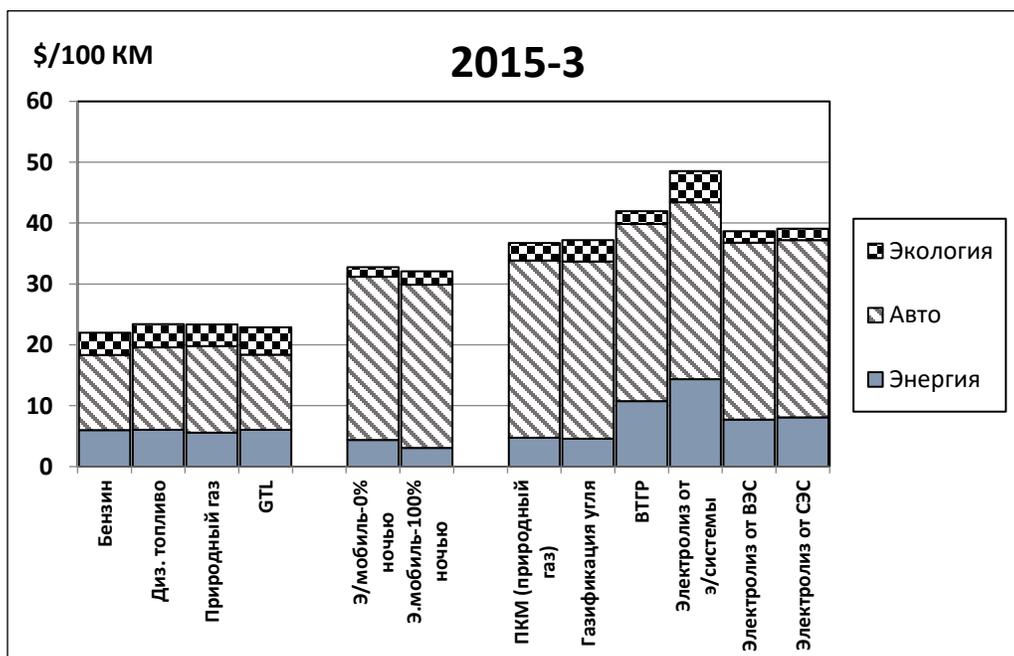
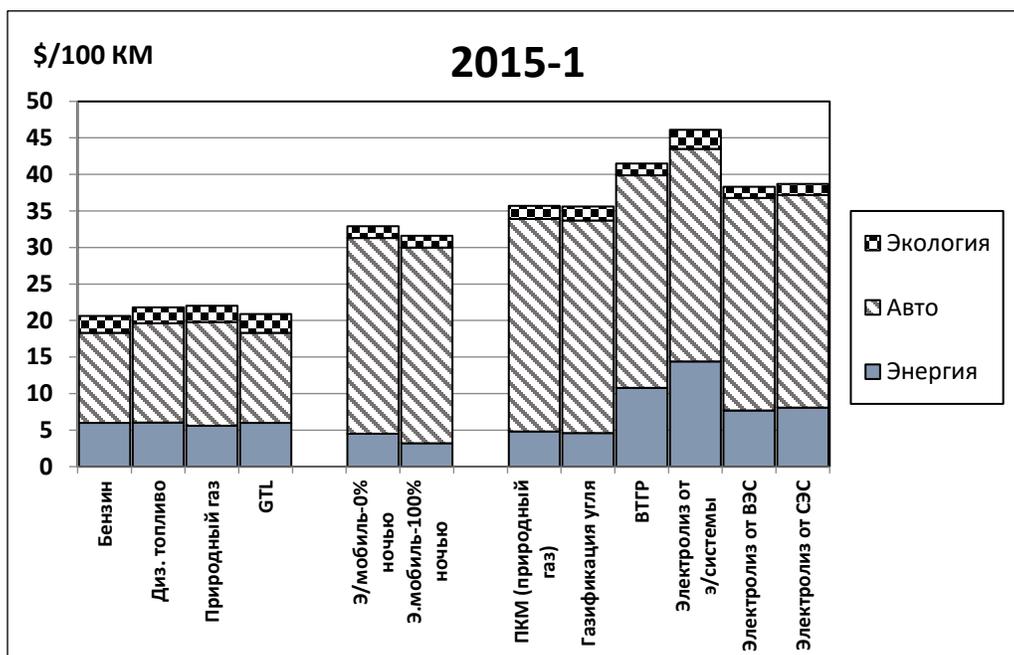


Рис. 16. Стоимость эксплуатации традиционных и новых технологий в автотранспорте в 2015 г. при минимальных ценах на энергоносители (1 и 3 – минимальные и максимальные оценки экологического ущерба от выбросов CO₂)

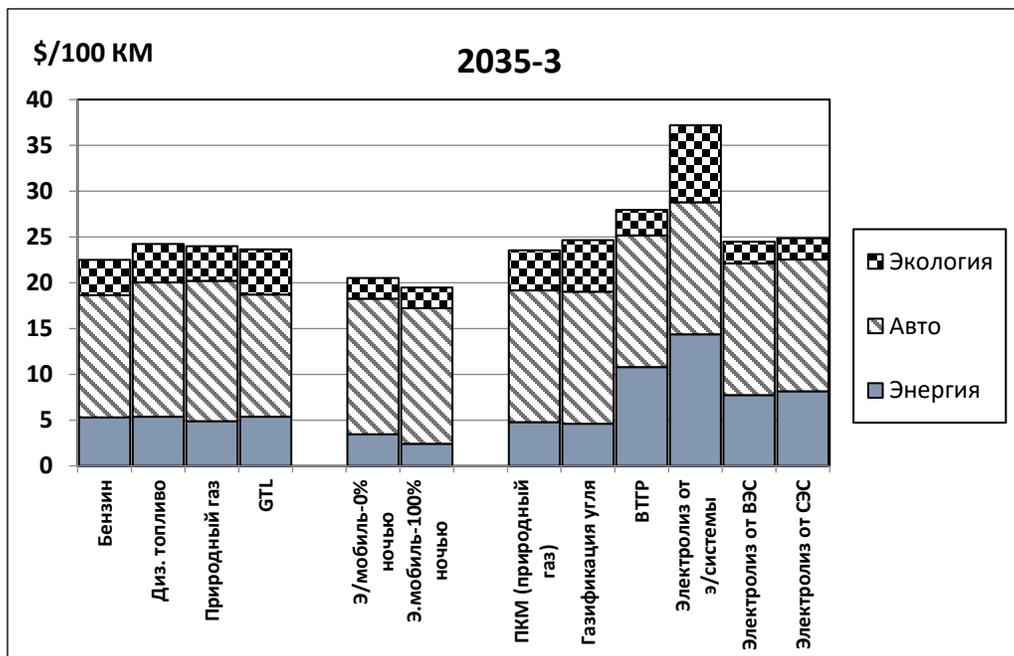
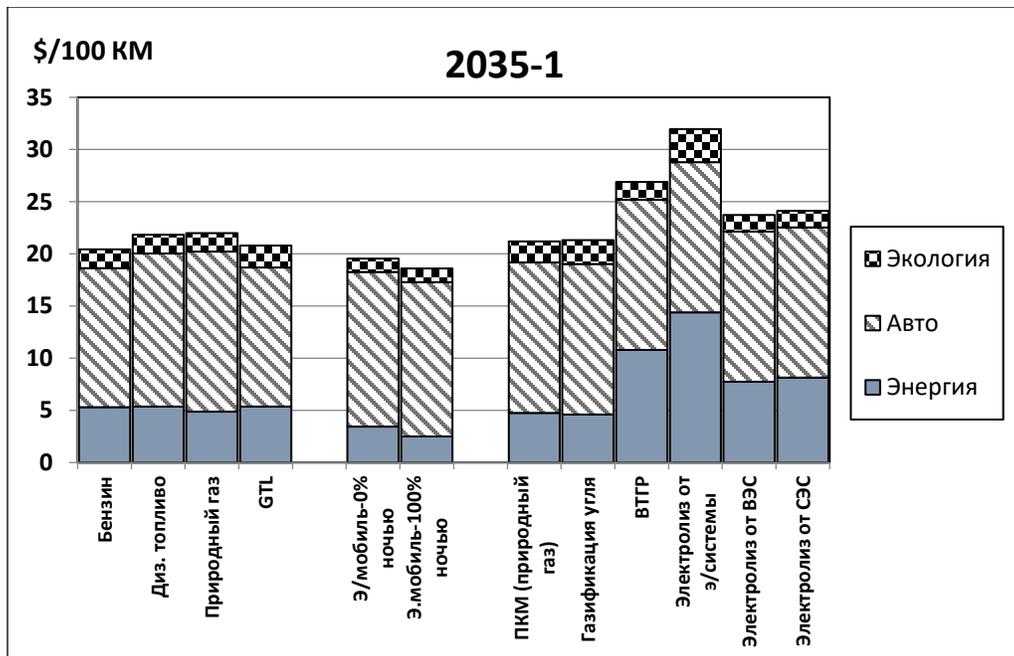


Рис. 17. Стоимость эксплуатации традиционных и новых технологий в автотранспорте в 2035 г. при минимальных ценах на энергоносители (1 и 3 – различные способы оценки экологического ущерба)

Сокращение годового пробега будет ухудшать экономику альтернативных технологий. Так, при пробеге 10 тыс. км в год граница коммерциализации электромобиля и водородного автомобиля сдвигается к 2035 г.

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).

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 сохранят 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 междугороднего 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.

Таковы 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.

6. Перспективы массового использования альтернативных топлив и технологий в автотранспорте (по материалам крупных зарубежных компаний и организаций)

6.1. Глобальные прогнозы ITF по развитию основных видов транспорта

*InternationalTransportForum (ITF)*⁹⁹ разработал систему моделей для разработки сценариев развития мирового транспорта и связанных с этим выбросов CO₂ до 2050 г. Разработка сценариев предполагает рассмотрение трансформации в двух основных секторах мирового транспорта: пассажирских и грузовых перевозках. Пассажирские перевозки включают прогнозирование мобильности населения в городах, на внутренних и междугородних путях сообщения и на международных направлениях. Сектор мирового грузового транспорта основан на прогнозах развития мировой торговли между основными регионами мира.

На рис. 18 представлена структурная схема моделирования развития мирового транспортного сектора.

Модель ITF позволяет моделировать дезагрегированные показатели текущих и будущих объемов перевозок. Население и валовой внутренний

⁹⁹InternationalTransportForum (ITF) является межправительственной организацией, объединяющей 59 стран-членов ОЭСР. Он выступает в качестве аналитического центра для разработки транспортной политики в странах сообщества. ITF является единственным глобальным органом, который охватывает все виды транспорта. ITF был создан в 2006 г. министрами транспорта из 43 стран. Корни МФТ восходят к 1953 году, когда 16 европейских стран учредили Европейскую конференцию министров транспорта (ЕКМТ), международную организацию для координации и рационализации европейского внутреннего транспорта международного значения.

продукт (ВВП) являются ключевыми факторами для разработки сценариев. Для прогнозов населения использованы оценки роста населения мира по расчетам Организации Объединенных Наций. Сценарии ВВП основаны на долгосрочных прогнозах, разработанных ОЭСР. Кроме того, в рамках модели ITF можно оценить влияние широкого диапазона мер экзогенные воздействия на результаты прогнозирования.

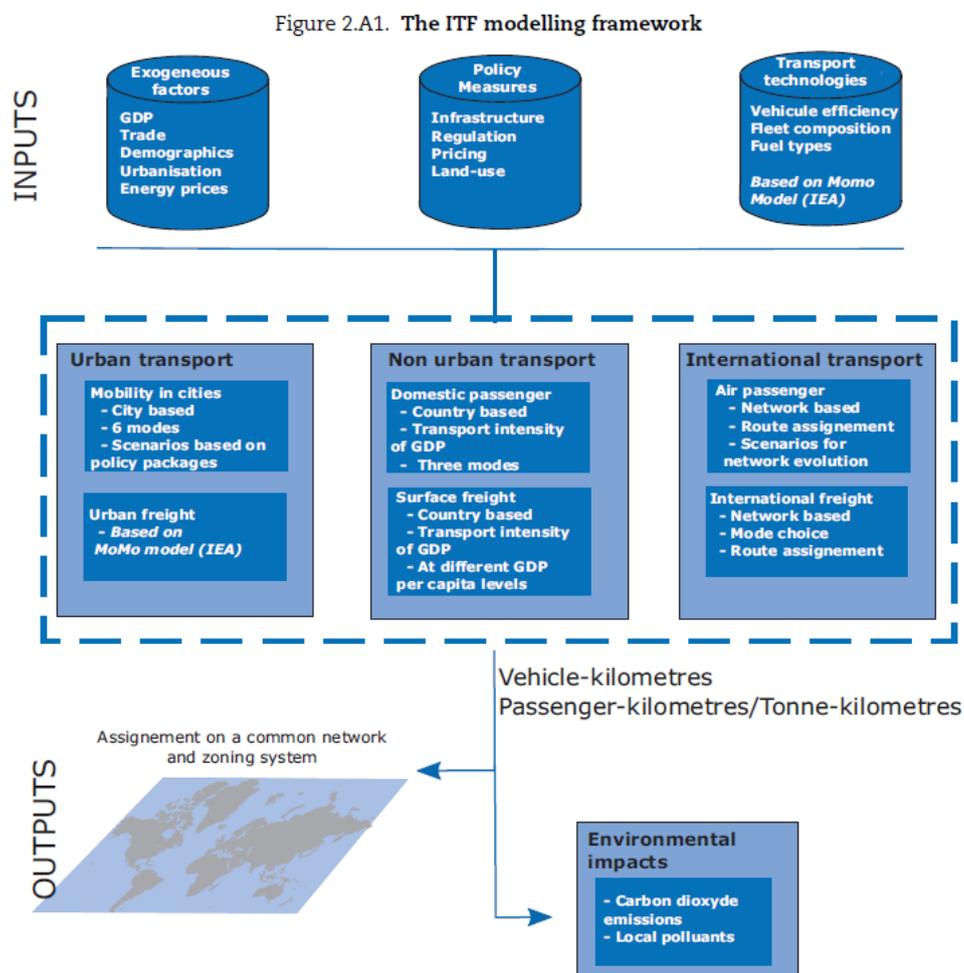


Рис. 18. Структурная схема моделирования развития мировой транспортной системы по модели ITF

Городской транспорт оценивается по модели, основанной на данных о 1667 городах с 300 тыс. жителей или больше, и результаты экстраполируются во все городские районы мира. Модель имитирует эволюцию переменных, которые определяют спрос транспортного сектора городах, например, рост населения, экономическую активность, цены на топливо, землепользование, наличие дорог, количество и качество общественного транспорта и т.п. Модель позволяет оценить уровни транспортной активности и влияние ряда факторов, которые возникают в различных модельных сценариях, например, влияние городской политики, которая способствует развитию общественного транспорта или снижению цен на топливо.

Международный грузовой транспорт описан двумя различными сетевыми моделями, которые учитывают потоки 19 товаров в системе зонирования 333 регионов мира.

Модель воздушного пассажирского транспорта является инструментом для обоснования рациональной авиационной политики. Модель отражает эволюцию объемов международных пассажирских перевозок (количество пассажиров и доход на пасс.-километр) до 2050 года в соответствии с различными политическими сценариями. Модель откалибрована в соответствии с требованиями ИКАО по 310 регионам мира. Это позволяет проводить более конкретный анализ на уровне регионов, стран или аэропортов.

Как грузовая, так и пассажирская активности используют ВВП в качестве основных экзогенных переменных для обоснования объемов перевозок. Эластичность ВВП зависит от уровня дохода страны и оценивается с использованием регрессионного анализа по отчетным данным ITF и International Road Federation.

В текущих прогнозах ITF рассмотрено три сценария.¹⁰⁰

1) **Baseline Scenario** - в базовом сценарии предполагается *продолжение тенденций прошлого периода*, никаких дополнительных мер, направленных на изменение склонности к поездкам или на сокращение выбросов CO₂ период 2015-2050 гг. не предпринимается. Этот сценарий, по сути дела, является традиционным "business-as-usual" подходом.

2) **ROG Scenario (The Robust Governance Scenario)** - предполагает, что местные органы власти играют активную роль в обосновании *политики ценообразования и регулирования с целью сокращения использования персональных транспортных средств после 2020 г.*

3) **LUT Scenario (the Integrated Land Use and Transport Planning Scenario)** - в дополнение к политике, представленной в сценарии ROG, сценарий LUT предполагает *более сильную ориентацию на устойчивое развитие и комплексную политику землепользования, особенно в городских условиях.*

Далее остановимся только на некоторых результатах развития пассажирского наземного транспорта, в наибольшей мере связанного с возможностями применения электромобилей.

В табл. 28 приведены прогнозы развития полной мобильности населения (включая все виды транспорта) по основным регионам мира в свете рассматриваемых сценариев прогнозирования.

Согласно сценарию *Baseline* полная мобильность населения в городах (измеренная в пассажиро-километрах) возрастает на 42% к 2030 г. и 94% к 2050 г. по сравнению с 2015 г., достигнув 25,5 и 34,9 трлн. пасс.-км, соответственно. При этом доля развитых стран (Европа, Северная Америка и

¹⁰⁰ITF Transport Outlook 2017 (itf_study.pdf)

страны СЭСР Тихоокеанского региона) в глобальной мобильности населения будет неуклонно снижаться: с 43% в 2015 г. до 34% в 2030 г. и 30% в 2050 г.

Меры, принимаемые в сценарии *ROG* мало влияют на общий уровень мобильности. Для развивающихся стран, где спрос на мобильность быстро растет, улучшение количества и качества общественного транспорта и снижения его стоимости значительно повышают уровень мобильности. Общественный транспорт становится более доступным для большой группы людей. Вот почему общий уровень мобильности в этих регионах оказывается выше в сценарии *ROG*, чем в исходном, где зависимость от автомобилей ограничивает использование моторизованной мобильности. Напротив, в уже сильно моторизованных развитых регионах, общественный транспорт должен компенсировать возросшую стоимость использования автомобиля. Если ограничения в использовании автомобилей будут введены без значительного улучшения системы общественного транспорта, то общий уровень мобильности будет сокращаться. В сценарии *LUT* эффективный контроль над размером городской территории приводит к сокращению разрастания городов и повышению плотности населения. Это приведет к снижению расстояний поездок и, соответственно, объемов перемещения пассажиров.

Таблица 28. Прогноз полной мобильности населения в городах по основным регионам мира, млрд. пасс.-км

| Region | 2015 | | | 2030 | | | 2050 | | |
|---------------|----------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|
| | Baseline | ROG vs Baseline | LUT vs Baseline | Baseline | ROG vs Baseline | LUT vs Baseline | Baseline | ROG vs Baseline | LUT vs Baseline |
| Africa | 989.8 | 2 016.5 | 12.1% | 0.0% | 3 788.1 | 37.7% | 6.5% | | |
| Asia | 6 476.6 | 10 785.2 | 8.9% | 3.8% | 15 281.5 | 25.6% | 13.9% | | |
| EEA + Turkey | 1 699.5 | 2 047.4 | 5.4% | 3.7% | 2 484.1 | 13.2% | 8.3% | | |
| Latin America | 1 875.0 | 2 513.8 | 4.3% | -0.1% | 3 397.8 | 17.5% | 7.8% | | |
| Middle East | 431.3 | 712.4 | 2.4% | -4.8% | 1 106.5 | 9.6% | -7.3% | | |
| North America | 3 039.3 | 3 704.7 | -1.9% | -1.8% | 4 701.9 | -1.3% | -1.0% | | |
| OECD Pacific | 2 975.1 | 3 152.9 | 0.3% | 0.7% | 3 375.8 | 10.5% | 11.8% | | |
| Transition | 504.6 | 567.3 | 5.2% | 4.8% | 764.7 | 16.5% | 7.4% | | |
| World | 17 991.3 | 25 500.1 | 5.5% | 1.7% | 34 900.4 | 19.4% | 9.1% | | |

Согласно прогнозам ИТФ, перевозки пассажиров личным автотранспортом будут быстро нарастать. Прежде всего это будет связано с ростом обеспеченности населения личным автотранспортом (количество авто на 1000 чел. населения) (рис. 19). Этот процесс будет связан, в первую очередь, с ростом доходов населения, особенно в развивающихся странах

В результате мировой парк легковых автомобилей в сценарии *Baseline* возрастет с 1 млрд. в 2015 г. до примерно 1,7 млрд. в 2030 г. и 2,4 млрд. в 2050 г. В то время как некоторые развитые страны уже достигли насыщения с точки зрения обеспечения автомобилями, а в некоторых даже начинает наблюдаться сокращение числа автомобилей на 1000 жителей, рост

населения и экономический рост в развивающихся странах будут способствовать дальнейшему росту числа автомобилей на дорогах в этих регионах. К 2050 г. развивающиеся страны будут владеть более трех четвертей транспортных средств мира, по сравнению с чуть менее половины в 2015 г. В частности, в сценарии *Baseline* общий парк автомобилей в Китае и Индии увеличится почти в пять раз, достигнув 877 млн. к 2050 г. Сильное регулирование использования автомобилей, особенно в городах, где местные власти ведут борьбу с заторами на дорогах и неблагоприятным воздействием загрязнителей на здоровье людей, может ограничить рост обеспеченности населения автомобилями и даже полностью его остановить.

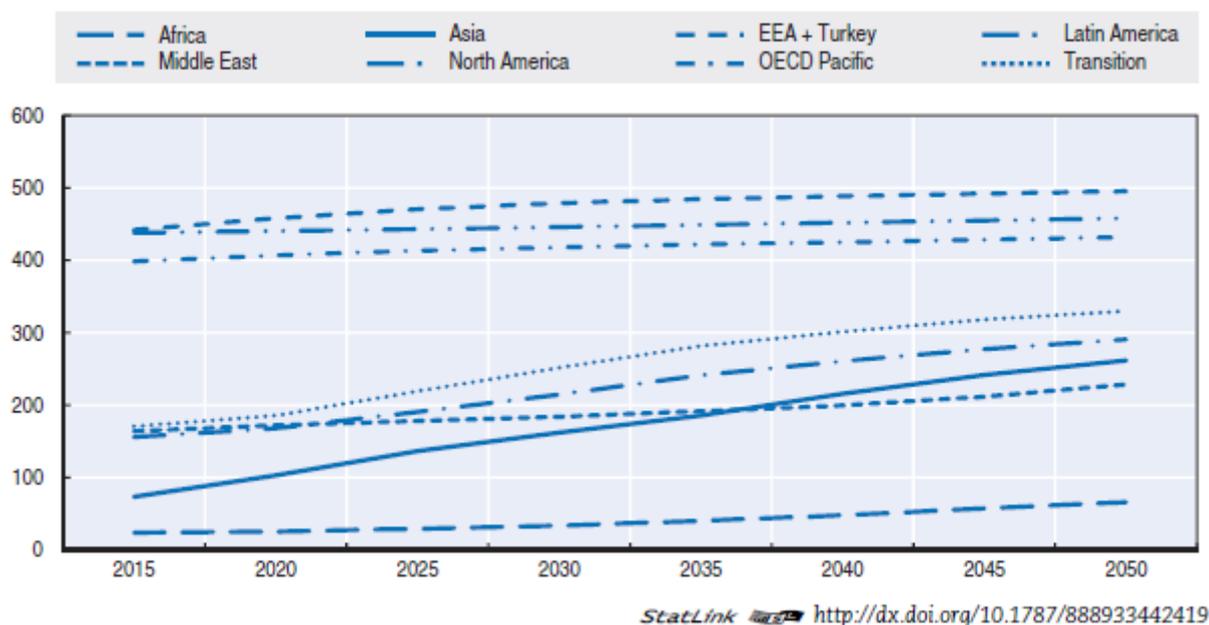


Рис. 19. Прогноз количества автомобилей на 1000 жителей по основным регионам мира в сценарии *Baseline*

На рис. 20 показаны тенденции изменения структуры пассажирских перевозок в мире.

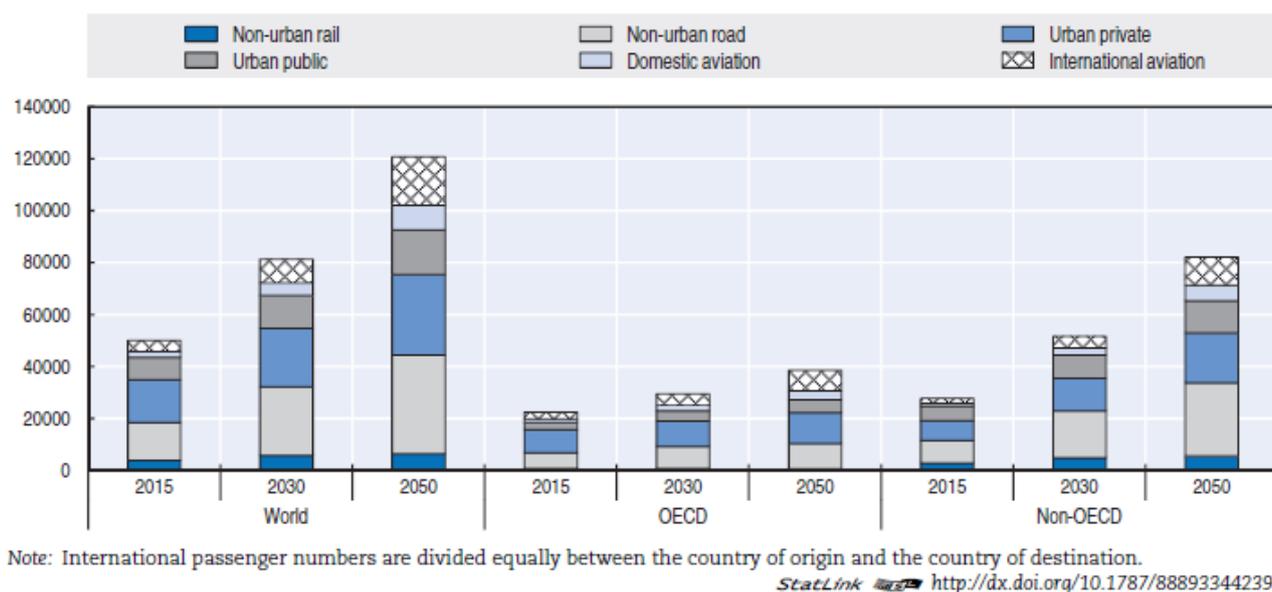


Рис. 20. Прогнозы структуры пассажирских перевозок в развитых и развивающихся странах в сценарии *Baseline*, млрд. пасс.-км

В сценарии *Baseline* спрос на глобальные пассажирские перевозки в период с 2015 до 2050 гг. возрастет более, чем в два раза – с 50 до 120 трлн. пасс.-км. Вполне разумно предположить, что легковые электромобили будут в основном конкурировать среди городских частных автомобилей, а городские электробусы – среди городского общественного транспорта. Тогда по сценарию *Baseline* величина городской пассажирской мобильности в целом по миру увеличится к 2050 г. с 25 трлн. пасс.-км (17 трлн. пасс.-км городские легковые автомобили и 8 трлн. пасс.-км – городской общественный транспорт) до 48 трлн. пасс.-км (30 трлн. пасс.-км городские легковые автомобили и 18 трлн. пасс.-км – городской общественный транспорт).¹⁰¹(рис. 21). При этом пассажирская мобильность в городах развитых стран в 2015 г. составляла около 11 трлн. пасс.-км, а в развивающихся странах – 14 трлн. пасс.-км (в обоих случаях на долю городской мобильности приходилось около 50% полной пассажирской мобильности). Ожидается, что городская мобильность к 2050 г. в целом по миру может возрасти до 48 трлн. пасс.-км, из них в развитых странах до 17 трлн. пасс.-км (рост на 55% к 2015 г), а в развивающихся странах – до 31 трлн. пасс.-км (рост в 2,2 раз к 2015 г.).

¹⁰¹ Оценки сделаны автором на основе приблизительных измерений по рис. 21.

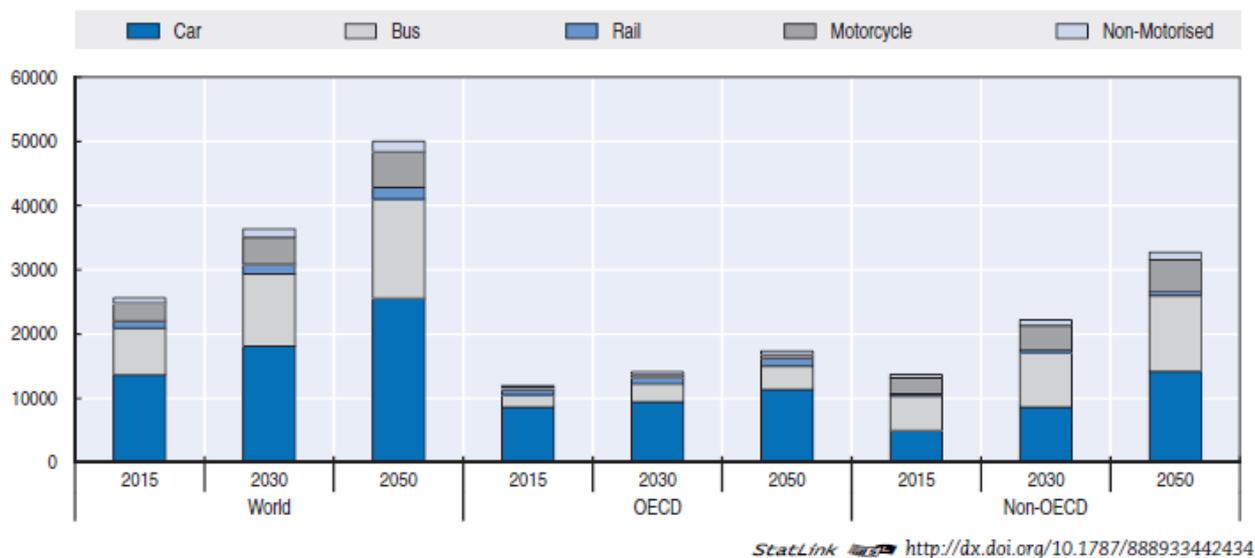


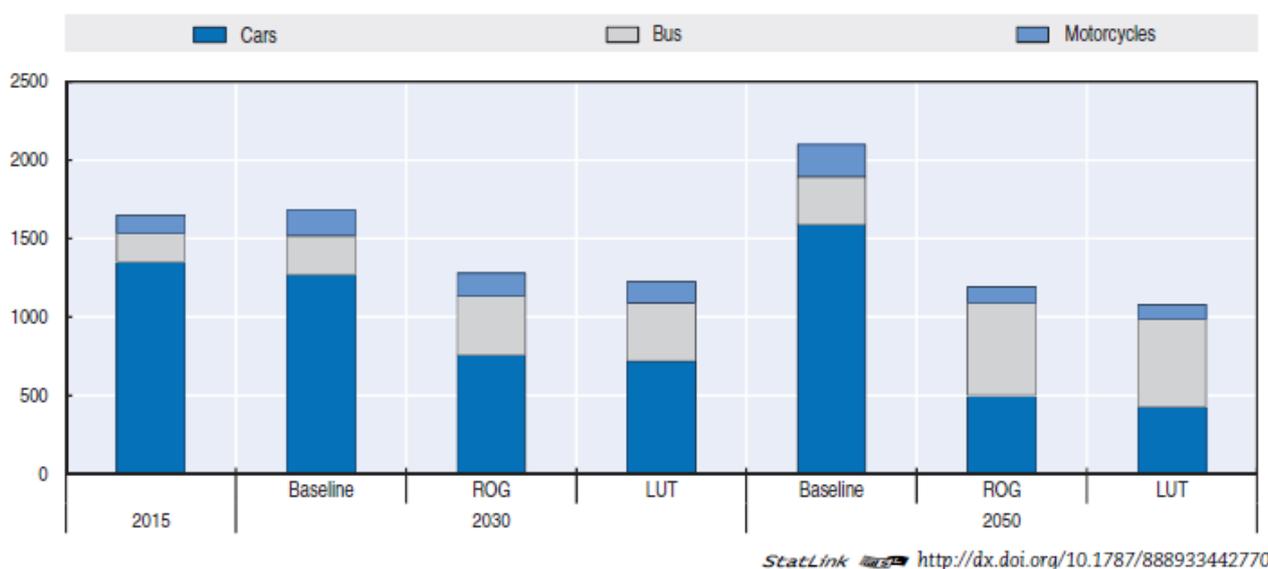
Рис. 21. Структура мобильности пассажирских перевозок в городах развитых и развивающихся стран в сценарии *Baseline*, млрд. пасс.-км

Важным фактором развития городского автотранспорта в ближайшие десятилетия становятся выбросы парниковых газов (в первую очередь CO₂). В табл. 29 и на рис.22. показаны прогнозы суммарных выбросов CO₂ автотранспорта в городах в региональном разрезе и по типам транспортных средств.

В сценарии *Baseline* уровень общих выбросов CO₂ автотранспортом крупных городов оказался в 2050 г. на 26% (419 млн. т CO₂) выше, чем в 2050 г. В период между 2015 и 2030 г. из-за увеличения эффективности использования топлива в традиционном автотранспорте и умеренных темпов экономического роста на период до 2020 г. выбросы CO₂ практически остаются на неизменном уровне. Как показывают расчеты, средняя эффективность использования топлива в легковом автотранспорте увеличивается на 29% с 2015 по 2030 гг., но в дальнейшем эти темпы снижаются только на 14% в период с 2030 года по 2050 гг. Этот темп улучшения технологии недостаточен, чтобы компенсировать растущий спрос на мобильность между 2030 и 2050 гг. Поэтому выбросы CO₂ начинают снова расти после 2030 г.

Таблица 29. Прогнозы суммарных выбросы CO₂ автотранспортом в городах в основных регионах мира по трем сценариям, млн. т

| | 2015 | | 2030 | | | 2050 | | | |
|----------------------|--------|----------|--------|--------|------------|----------|--------|--------|------------|
| | | Baseline | ROG | LUT | LUT vs ROG | Baseline | ROG | LUT | LUT vs ROG |
| Africa | 41.9 | 75.3 | 60.3 | 52.8 | -12.4% | 155.7 | 76.5 | 59.9 | -21.7% |
| Asia | 323.4 | 510.1 | 401.7 | 376.9 | -6.2% | 760.3 | 437.2 | 385.8 | -11.8% |
| EEA + Turkey | 163.8 | 134.5 | 109.3 | 107.0 | -2.1% | 132.8 | 96.1 | 90.9 | -5.3% |
| Latin America | 133.5 | 161.3 | 133.7 | 126.9 | -5.1% | 216.4 | 141.5 | 126.6 | -10.6% |
| Middle East | 45.2 | 70.5 | 59.2 | 54.5 | -7.9% | 118.7 | 72.2 | 60.2 | -16.7% |
| North America | 592.6 | 469.8 | 344.1 | 343.5 | -0.2% | 457.1 | 238.1 | 237.7 | -0.2% |
| OECD Pacific | 303.8 | 202.2 | 129.2 | 128.9 | -0.2% | 168.2 | 88.5 | 88.2 | -0.4% |
| Transition | 34.9 | 35.3 | 24.1 | 23.5 | -2.7% | 49.5 | 22.5 | 19.7 | -12.2% |
| World | 1639.1 | 1659.0 | 1261.6 | 1214.0 | -3.8% | 2058.5 | 1172.5 | 1069.0 | -8.8% |



StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933442770>

Рис. 22. Прогнозы выбросов CO₂ различными типами пассажирского автотранспорта по различным сценариям, млн. т

Применение методов регулирования, особенно в области политики ценообразования на автомобили, рост цен на моторное топливо и выбросы углерода, представленные в сценарии *ROG*, могут привести к сокращению выбросов CO₂ в секторе городского пассажирского транспорта. Эти методы могут снизить эмиссию CO₂ в сценарии *ROG* на 397 млн. т в 2030 г. и на 886 млн. т в 2050 г. по сравнению с исходным уровнем. Дополнительные меры, предусматриваемые в сценарии *LUT* приведут к дальнейшему сокращению выбросов CO₂ на 48 млн. т в 2030 г. и 104 млн. т в 2050 г. В результате в наиболее эффективном сценарии *LUT* глобальный уровень выбросов CO₂ от городского транспорта будет на 26% ниже в 2030 г. и на 35% ниже в 2050 году по сравнению с уровнем 2015 г.

6.2. Перспективы роста парка электромобилей и их влияние на нефтяной рынок и спрос на электроэнергию

6.2.1. Текущее состояние продаж электромобилей в мире

В середине 2018 г. во всем мире было продано более 3,5 млн. легковых электромобилей и около 421 тыс. электроавтобусов, в результате чего общая величина продаж составила почти 4 млн. Ведущую роль в распространении электромобилей принадлежит Китаю, где продажи легковых электромобилей составили около 37% от мирового уровня и около 99% от всех проданных электроавтобусов. На рис. 23 показаны распределение продаж по странам в период 2012-2018 гг. и прогноз на 2019 г.¹⁰²

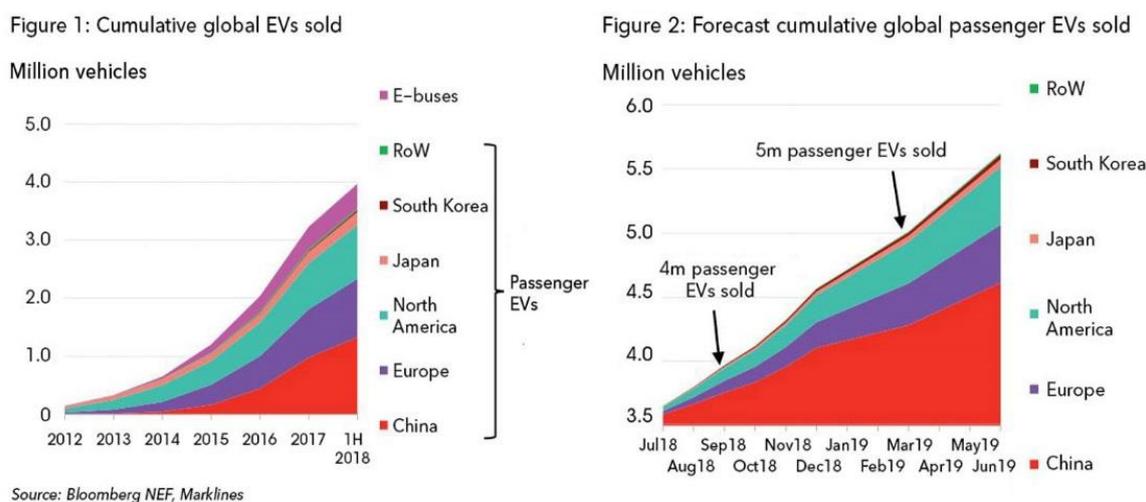


Рис. 23. Продажи электромобилей, включая электрические автобусы, в 2012-2018 гг. и прогнозы продаж легковых электромобилей на 2019 г.

(Источник: <https://about.bnef.com/blog/cumulative-global-ev-sales-hit-4-million/>)

Как следует из динамики продаж, время, необходимое для достижения каждого нового проданного миллиона электромобилей сокращается. Первый миллион был достигнут в 4 квартале 2015 г. На это потребовалось около 60 месяцев. Прирост каждого следующего миллиона требовал значительно меньших затрат времени (рис. 24). Следующий миллион был продан в течение 6 месяцев. Все это говорит о быстром росте парка электромобилей в мире.

¹⁰² <https://about.bnef.com/blog/cumulative-global-ev-sales-hit-4-million/>

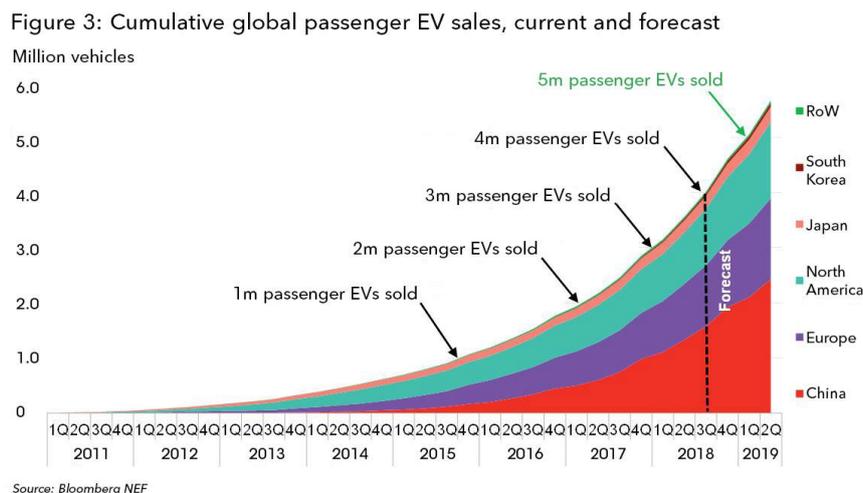


Рис. 24. Темпы роста продаж электромобилей по странам

6.2.2. Прогнозы развития электромобилей по оценкам крупных компаний и организаций

- Прогнозы ИЕО 2018¹⁰³ Международное энергетическое агентство, кажется, впервые в 2018 г. в своих последних публикациях серьезно отнеслось к вопросам электрификации транспорта и, в частности, к развитию электромобилей. В последнем издании прогнозов развития мировой энергетики был представлен "электрический сценарий", где отмечается, что следует ожидать высоких темпов развития электромобилей, несмотря на высокую стоимость этих транспортных средств и отсутствии инфраструктуры по сравнению с автомобилями на нефтяных топливах. Подчеркивается, что уже к середине 2020-х годов в Японии, Корее и многих европейских странах электромобили достигнут паритет по затратам с традиционными ДВС на нефтяных топливах. Здесь большую роль в развитии этого процесса будет оказывать высокая система налогообложения нефтяных топлив. В Индии, где транспортных средства имеют существенно меньшие размеры, чем в развитых странах, а налогообложение нефтетоплив относительно невелико, можно ожидать, что процесс активного перехода на электромобили будет несколько отодвинут к 2030 г. Паритет стоимости электромобилей и ДВС в Северной Америке является более сложным из-за относительно низкого налога на топливо и склонности населения иметь более крупные транспортные средства и предпочитать более протяженные поездки.

По оценкам WEO-2018, сроки наступления паритета в стоимости эксплуатации электромобилей и авто с ДВС по регионам мира можно ожидать в следующие годы:

¹⁰³ IEA, World Energy Outlook 2018, OECD/IEA, 2018.

| <i>Регионы мира</i> | <i>Автомобили</i> | <i>Автобусы</i> | <i>2/3- колесные средства</i> |
|-------------------------|-------------------|-----------------|---------------------------------------|
| США | >2030 | 2030 | <2025 |
| ЕС | >2025 | 2020-2030 | <2020 |
| Юго-Вост. Азия | 2025-2030 | 2030 | <2020 |
| Индия | <2025 | 2030 | <2020 |
| Китай | <2025 | 2030 | <2020 |

В табл. 30 приведены прогнозы развития парка электромобилей для двух энергетических сценариев (NPS–NewPoliciesScenarioи FiES–FutureisElectricScenario).

Таблица 30. Величина парка электрифицированных транспортных средств в сценариях WEO-2018*

| | <i>NPS</i> | <i>FiES</i> |
|-----------------------|------------|-------------|
| Автомобили | 330 млн. | 1100 млн. |
| 2/3-колесные средства | 750 млн. | 900 млн. |
| Грузовые авто | 0,4 млн. | 7 млн. |
| Автобусы | 4 млн. | 8 млн. |

* Оценено автором ориентировочно по графику Fig. 9.11 в материале WEO-2018.

Развитие электрифицированного транспорта потребует дополнительного количества электроэнергии. В частности, прирост мирового спроса на электроэнергию в 2040 г. для обеспечения электрифицированного транспорта может составить в сценарии NPSоколо 1,8 тыс. ТВтч и в сценарии FiES – более 4 тыс. ТВтч.

- Прогнозы компании Bloomberg.¹⁰⁴По прогнозам компании Bloomberg, в 2040 г. более 50% продаж новых автомобилей и 33% мирового автопарка будут электрическими. Падение цен на батареи приведет к росту конкурентоспособности электромобилей (даже без субсидирования их цены) во всех основных сегментах легкового автотранспорта до 2030 г., что будет способствовать повышению темпов спроса на автомобили с электроприводом (рис. 26 и рис. 27). Ожидается, что точка перелома в развитии электромобилей будет находиться между 2025 и 2030 гг.

¹⁰⁴Bloomberg New Energy Finance’s 2017 Long Term Electric Vehicle Outlook. <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>

Как видно из рис. 26, до 2040 г. будет наблюдаться равномерный рост продаж автомобилей всех типов (с менее 75 млн. в 2015 г. до 120 млн. в 2040 г.) При этом количество проданных электромобилей возрастет с 5 млн. в 2025 г. (8% от всех продаж) до почти 65 млн. в 2040 г. (54%).

Соответственно, мировой парк автомобилей возрастет с 1 млрд в 2015 г. до 1,6 млрд. в 2040, из них к 2040 г. почти 530 млн (33%) будут являться электромобилями.

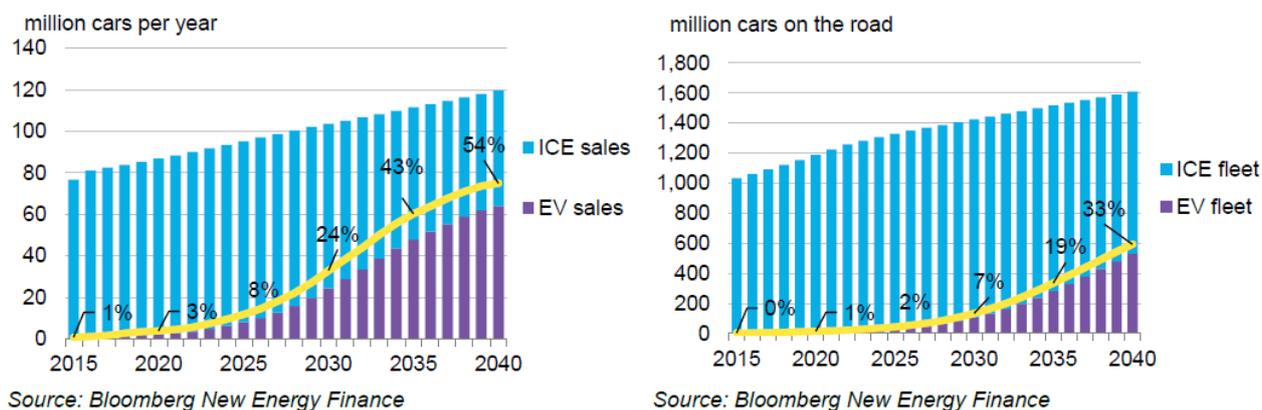


Рис. 26. Прогнозы продаж новых легковых автомобилей и их доли в мировом автопарке

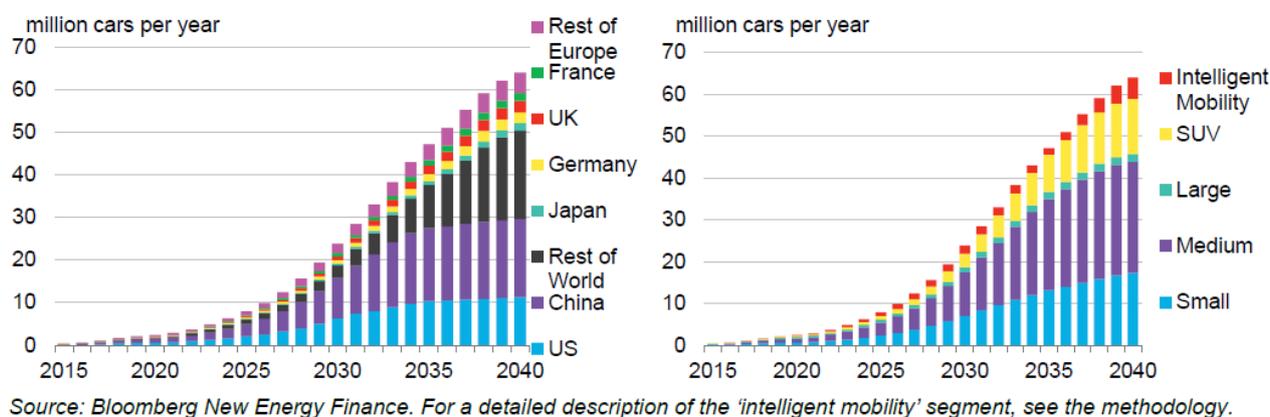


Рис. 27. Прогнозы продаж электромобилей по крупным странам мира и по их типу

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 будет приходиться на электромобили компакт-класса более 20 млн. в 2040 г. и 15 млн. на малые электромобили., более 10 млн. составят спортивные авто с электрическим приводом. Интересно отметить, что к 2040 г. ожидается производство "умных" электромобилей (автономного вождения, для carsharing и др.) составит всего менее 5 млн. шт.

Спрос на литий-ионные аккумуляторы для электромобилей увеличится с 21 ГВтч в 2016 г. до 1300 ГВтч к 2030 г. Ожидается, что уже в 2021 г. производство крупноформатных литий-ионных батарей может составить 270 ГВтч. Потребление электроэнергии электромобилями достигнет 1800 ГВтч к 2040 году по сравнению с 6 ГВтч в 2016 г. Хотя это составит всего около 5% от прогнозируемого глобального потребления электроэнергии в 2040 г. Потребность в органическом топливе на легковой автотранспорт будет сокращаться в связи с развитием электромобильного транспорта. Как следует из прогнозов компании Bloomberg, это приведет в 2040 г. к вытеснению из спроса транспортного сектора до 8 млн. барр./сут сырой нефти..

- Прогнозы ОПЕК 2018.¹⁰⁵ Увеличение транспортных средств является ключевым фактором, способствующим росту потребления нефти в мире. По оценкам ОПЕК, общий мировой парк автомобилей к 2040 г. достигнет 2,44 млрд. Из этого количества легковые автомобили составят около 1,98 млн. (81%), из них – 1,16 млн. в развивающихся странах (около 48%). Наиболее быстрый рост парка ожидается в Китае, где прирост легковых автомобилей практически возрастет на 291 млн. и приведет к удвоению парка легковых авто. Далее следует регион Прочей Азии с приростом в 167 млн. и увеличением парка в 3,6 раза. Предполагается, что парк легковых автомобилей в ОЭСР за рассматриваемый период увеличится незначительно (на 73 млн. и составит около 700 млн. авто). Одновременно следует ожидать удвоения парка коммерческих (грузовых) автомобилей: с 230 млн. автомобилей в 2017 г. до 462 млн. к 2040 г. При этом рост парка коммерческих авто в развитых странах увеличится на 42% (от 104 млн. до 168 млн.), а в развивающихся странах – в 2,6 раза (от 115 млн. до почти 300 млн.).

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% (43% - "чистые" электромобили и 9% гибриды). Продажи электромобилей в развивающихся странах будет проходить в более медленном темпе: в Китае – 40% (в том числе "чистые" электромобили 30% и гибриды 10%), в Индии – 25% (20% и 5%), в Евразии – 20% (17% и 3%). В результате к 2040 г. доля электромобилей в мировом парке легковых автомобилей всех типов достигнет 15%, т.е. составит около 300 млн. авто с электрическим приводом. Кроме того, около 5% будет приходиться автомобили с альтернативными видами топлива (рис. 28).

¹⁰⁵Organization of the Petroleum Exporting Countries. 2018 OPEC World Oil Outlook. October 2017. <http://www.opec.org>.

Тренды продаж электромобилей в коммерческом автотранспорте будут существенно ниже. В целом по миру доля коммерческих электромобилей к 2040 г. не превысит 10% (в том числе: 7% "чистые" электромобили и 3% гибриды). В результате прогнозируется, что парк коммерческих автомобилей в 2040 г. будет насчитывать около 442 млн., из них 4% будет приходиться на "чистых" электромобилей и 6% на авто с альтернативными видами топлива – прежде всего на природном газе(рис. 29).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%.

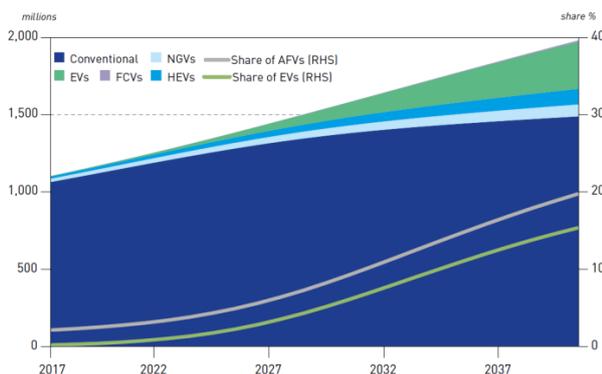


Рис. 28Прогноз структуры мирового парка легковых автомобилей и доля в нем электромобилей и авто с альтернативными видами топлива

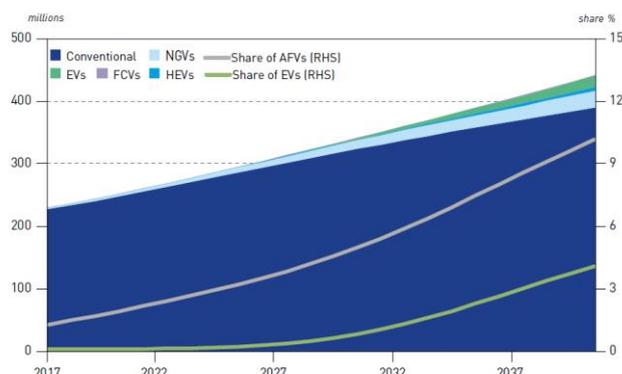


Рис. 29. Прогноз структуры мирового парка коммерческих автомобилей и доля в нем электромобилей и авто с альтернативными видами топлива

Для учета значительной неопределенности, связанной с распространением электромобилей в прогнозе ОПЕК рассмотрены два дополнительных сценария: "Быстрое распространение электромобилей(EVfastpenetration)" и "Медленное распространение электромобилей (EVslowpenetration)" (рис. 30).

Как следует из рис. 30,максимальный уровень количества электромобилей в 2040 г. ожидается в сценарии "EVfastpenetration" в размере около 35% (700 млн.) от парка легковых автомобилей и минимальный – в сценарии "EVslowpenetration"– 7% (140 млн.). ReferenceCaseсоответствует 15% (300 млн.). Во всех сценариях 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.

На рис. 30 показаноожидаемое сокращение спроса на сырую нефть в результате вытеснения нефти электроэнергией в сегменте легковых автомобилей.Как следует из графика, следует ожидать дальнейшего

увеличениями мирового спроса на нефть в секторе легковых автомобилей до 2023-2025 гг. до уровня около 27 млн. барр./сут., т.е. на 2 млн. барр./сут. больше, чем в базовом 2017 г. После 2025 г. начнется сокращение потребления нефти легковым автотранспортом. При этом в сценарии с медленными темпами развития электромобилей спрос на нефтетопливо в сегменте легковых автомобилей практически остается неизменным на достигнутом уровне. В этом сценарии рост спроса в развивающихся странах будет компенсироваться снижением в развитых странах. В случае быстрого развития электромобилей мировой спрос будет сокращаться после достигнутого максимума в 2025 г. и к 2040 г. снизится на 4,2 млн. барр./сут. В этом случае потребление нефти сократится до 22,8 млн. барр./сут. В сценарии ReferenceCase к 2040 г. потребление нефти легковым автотранспортом может составить около 25 млн. барр./сут.

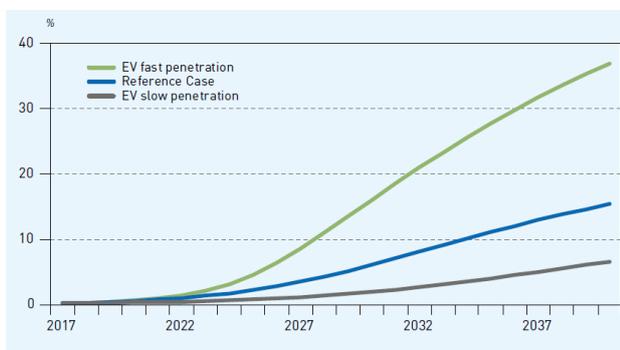


Рис. 30. Прогнозы развития электромобилей в трех сценариях учета неопределенности:
 1 – EVfastpenetration;
 2 –ReferenceCase;
 3 –EVslowpenetration

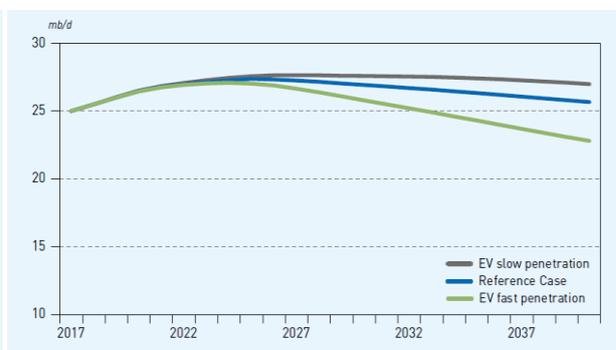


Рис. 31. Прогнозы сокращения спроса на сырую нефть в секторе легковых автомобилей в трех сценариях учета неопределенности:
 1 – EVfastpenetration;
 2 –ReferenceCase;
 3 –EVslowpenetration

На рис. 32 показаны прогнозы изменения суммарного мирового спроса на сырую нефть в результате различных темпов развития электромобилей.

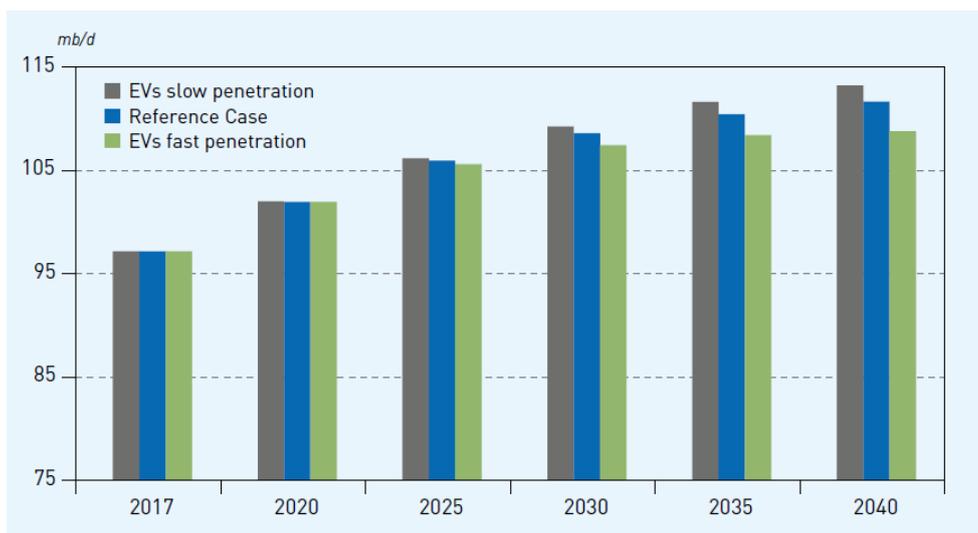


Рис. 32. Прогноз мирового спроса на нефть для трех сценариев развития электромобилей

Как следует из прогнозов ОПЕК, в период до 2040 г. пика в мировой добыче сырой нефти ожидать не приходится. При медленном развитии электромобилей (сценарий "EVslowpenetration") спрос на нефть возрастает до 113 млн. барр./сут. Быстрое развитие электромобилей (сценарий "EVfastpenetration") приводит к некоторому сокращению мирового спроса на нефть: до 109 млн. барр./сут. Разница в 4 млн. барр./сут. (200 млн. т/год) составляет максимальный эффект (-3,5% от годового спроса в 2040 г.) в случае интенсивного перехода к электромобилям в легковом автотранспорте.

- Прогнозы Standard&Poors¹⁰⁶ Долгосрочные прогнозы развития энергетики в исследованиях S&P основаны на следующих выводах:

1) Ископаемое топливо доминировало на транспорте в прошлом веке и скорее всего, сохранит свое ведущее положение в обозримом будущем. Тем не менее, новые технологии и альтернативные виды топлива, угрозы изменения климата планеты, появление новых драйверов на мировых рынках могут угрожать его доминированию, как никогда раньше.

2) Совершенствование и удешевление электрических батарей могут сделать стоимость электромобилей конкурентоспособной в течение ближайшего десятилетия. Это заставит производителей автомобилей инвестировать десятки миллиардов долларов в расширение производства электромобилей, что отразится на снижении потребления сырой нефти.

3) Электрификация не является единственной потенциальной проблемой для рынка нефти. Автономные транспортные средства могут изменить рынок транспортных услуг в сторону их удовлетворения меньшим количеством

¹⁰⁶Standard&Poors Global Platts. Changing Lanes – a Roadmap for Transport and Future Energy Markets, February 2018. <https://secure.viewer.zmags.com/publication/3a128229#/3a128229/2>

автомобилей на дороги. Это должно отразиться на расходах топлива, продажах автомобилей и даже городском дизайне. При этом электромобиль не является последней инстанцией в совершенствовании транспортных технологий. Со временем водород может составить активную конкуренцию электроэнергии, особенно среди тяжелых грузовых автомобилей и автобусов.

4) Электрификация легкового автотранспорта еще не гарантирует экономическую эффективность этого направления. Время зарядки аккумуляторов и диапазон пробега на одной зарядке являются остаются серьезными проблемами. Пока еще общая производительность электромобилей значительно ниже, чем у ДВС. В настоящее время отсутствие необходимого количества зарядных станций ограничивает распространение электромобилей. Расходы на электромобили и аккумуляторы должен сократиться до уровня, при котором больше не существует преимуществ для использования автомобиля с ДВС. По оценкам S&P, это может произойти в период 2025-2030 гг., когда стоимость аккумуляторов достигнет уровня не более 100 долл./кВтч и доля электромобилей в общем мировом парке автомобилей приблизится к 2%, а суточный пробег электромобилей составит более 2,3 млн. км/сут. (рис. 33).

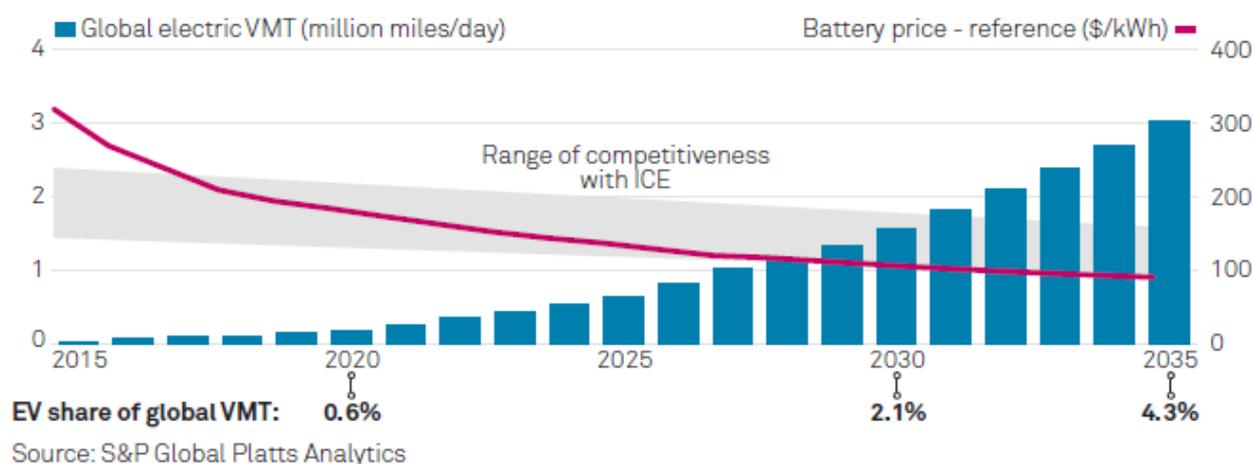


Рис. 33. Условия выхода электромобилей на уровень конкурентоспособности с ДВС

По оценкам S&P, в 2040 г. мировой парк легковых автомобилей возрастет до 1,7 млрд. авто по сравнению с 900 млн. в 2017 г. На этом фоне тенденции распространения электромобилей могут быть описаны в виде трех сценариев:¹⁰⁷ 1) слабые стимулы для развития электромобилей (Niche market) – 120 млн. в 2040 г., 2) базовый сценарий (Platts reference) – 300 млн. и 3) экономически привлекательный при 90%-ой доле электромобилей в продаже новых автомобилей к 2030 г. (Car of choice) – 520 млн. (рис. 34).

¹⁰⁷ Названия сценариев интерпретированы автором для лучшего понимания читателями содержания сценариев.

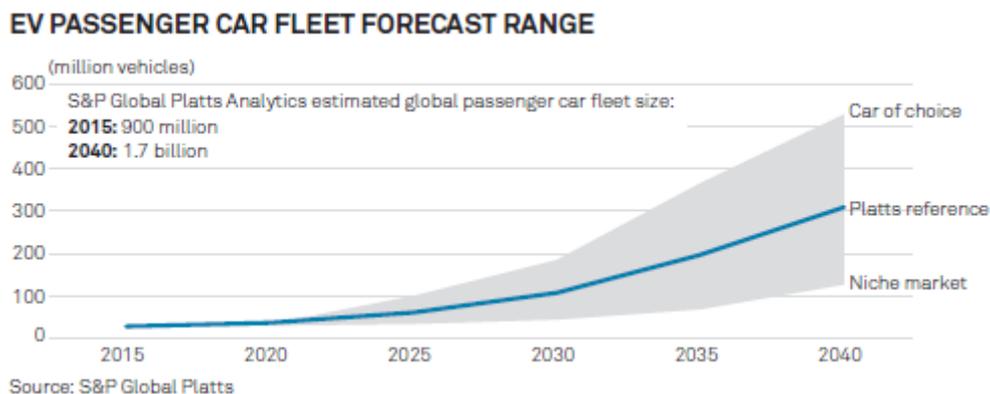


Рис. 34. Прогнозы распространения электромобилей в мире по оценкам S&P

Развитие электромобильного транспорта в период до 2040 г. будет оказывать умеренное влияние на формирование мирового спроса на сырую нефть. При этом в рассматриваемом периоде не следует ожидать наступления пика добычи нефти. Как показано нарис. 35, в сценарии *Reference Case* мировой спрос на нефть возрастет к 2040 г. на 17 млн. барр./сут. и составит 117 млн. барр./сут. по сравнению с 100 млн.барр./сут. в 2017 г. При этом следует ожидать, что потребление нефтетоплива на привод легковых автомобилей практически не изменится (25 млн. барр./сут.), а расходы в грузовом автотранспорте возрастут на 7 млн. барр./сут. с 23 млню барр./сут. в 2017 г до 30 млн. барр./сут.

При более интенсивном развитии электромобилей (сценарий *Car of choice*) расходы легкового автотранспорта сократятся до 20 млн. барр./сут. к 2040 г. (-5 млн. барр./сут.),а грузового автотранспорта возрастут до 25 млн. барр./сут. (+2 млн. ба./сут.) по сравнению с базовым уровнем 2017 г. В итоге суммарный спрос на нефть в этом сценарии сожт составить около 114 млн. барр./сут.

По оценкам S&P, спрос на нефть будет снижаться на 1,2 млн.барр./сут. на каждые 100 млн. дополнительных электромобилей, выезжающих на дороги в 2040 г.

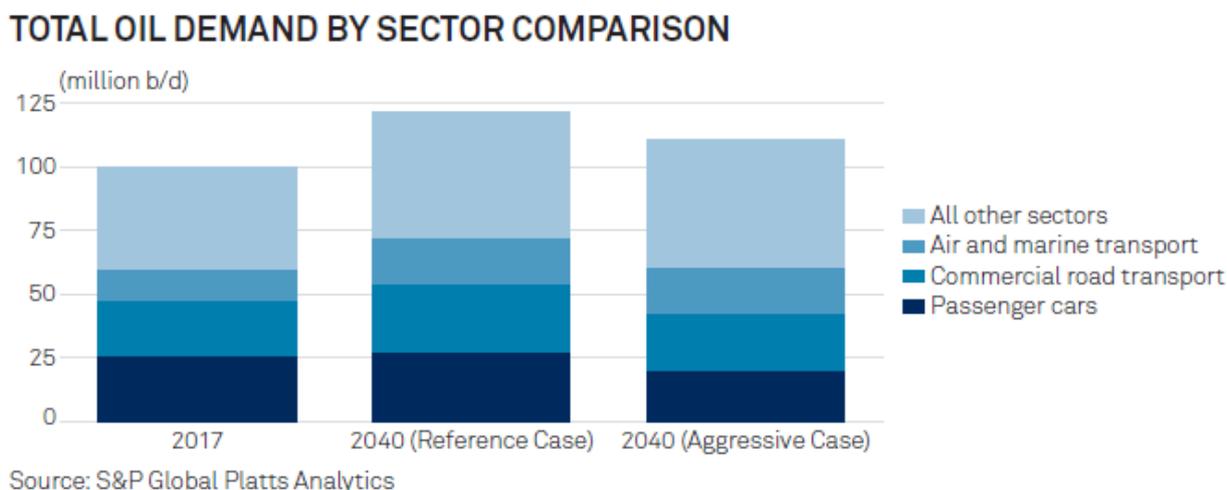


Рис. 35. Оценка влияния электромобилей на спрос на нефть

Для оценки дополнительного спроса на электроэнергию в электромобилях в прогнозах S&P были использованы оценки WEO 2017 на 2040 г.: 240 млн. электромобилей для замены легковых автомобилей (LightDutyVehicles) и 39 млн. электромобилей тяжелого типа (HeavyDutyVehicles—грузовики и автобусы). Для обеспечения рассматриваемого количества электромобилей потребуется дополнительное производство электроэнергии: для обеспечения легких электромобилей 532 ТВтч в год (или 1,55% от спроса на электроэнергию в 2040 г.) и 2700 ТВтч в год для обеспечения тяжелых электромобилей (7,85% от спроса) (рис 36).

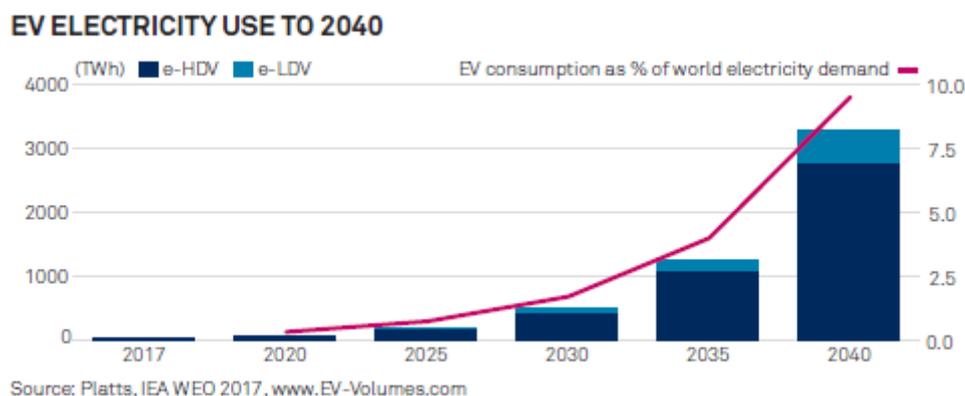


Рис. 36. Оценка дополнительного спроса на электроэнергии для обеспечения электромобилей: LDV—легкие электромобили, HDV—тяжелые электромобили

- Прогнозы GoldmanSachsGroup.¹⁰⁸ Компания ожидает, что интенсивное развитие электромобилей начнется после 2025 г. Это произойдет, когда стоимость аккумуляторов (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. В 2015 г. в США для обеспечения условий конкурентоспособности электромобилей правительство делало дотации в размере 8462 долл. на новый электромобиль, чтобы выполнить условие трехлетнего срока окупаемости электромобилей. К 2020 г. эти дотации могут сократиться до 3481 долл., а к 2025 г. упасть до 653 долл.¹⁰⁹ Предполагается, что электромобиль станет полностью конкурентоспособным при стоимости аккумуляторов около 100 долл./кВтч.

Развитие электромобилей приведет к многократному увеличению производства литий-ионных аккумуляторов: от 17 ГВтч в 2015 г. до 2319 ГВтч в 2040 г. (рост в 136 раз). Увеличение цен на литий, который составляет около 5-10% стоимости аккумуляторов, может задержать процесс электромобилизации. Эти опасения не случайны, так как в последние годы

¹⁰⁸The Goldman Sachs Group Inc., Electric Vehicle Boom: ICE-ing The Combustion Engine. EQUITY RESEARCH, September 6, 2017.

¹⁰⁹Там же.

наблюдается быстрый рост стоимости литий: только в период с 2015 до 2017 гг. она увеличилась с 5 долл./кг до 12 долл./кг.

По оценкам Goldman Sachs Group, доля электромобилей в продажах новых автомобилей увеличится с 1% (560 тыс. шт.) в 2016 г. до 8% (9,72 млн. шт.) в 2030 г. и 32% (44,19 млн. шт.) в 2040 г. Компания не исключает, что при благоприятных условиях продажи электромобилей в 2040 г. могут достичь даже более 70 млн. шт. 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%).

Распространение электромобилей в мире будет сопровождаться снижением спроса на сырую нефть. При этом считается, что увеличение доли электромобилей на 5% будет способствовать сокращению потребности в нефти на 1,5%.

- Прогнозы компании BP 2018.¹¹⁰ В исследованиях BP 2018 г. предполагается, что рост благосостояния в развивающихся странах приведет к увеличению спроса на топливо на транспорте, несмотря на одновременное значительное повышение эффективности его использования. В сценарии ET (*эволюционная трансформация*) предполагается, что глобальный спрос на услуги пассажирских и грузовых перевозок увеличится к 2040 г. более, чем в два раза. Ожидается, что количество легковых автомобилей на планете значительно увеличивается к 2040 г. и составит 2 млрд. авто, включая более 300 миллионов электромобилей (рис. 37). Интересно отметить, что эти оценки пересмотрены в сторону увеличения по сравнению с выпуском 2017 г. Темпы повышения эффективности использования топлива мировым парком автомобилей повышены на 2-3% в год, что выше, чем за последние 15 лет (2000-2015 гг.). Это обусловлено ужесточением регулирования и принятием более высоких целей, в рамках которых работают транспортные системы в странах мира. В ЕС новые автомобили в 2040 г., вероятно, будут на 70% эффективнее, чем в 2000 году. Типичный новый легковой автомобиль с ДВС в ЕС к 2040 г. снизит потребление топлива до 3 л на 100 км по сравнению с 5 л в 2015 г. и 7 литрами в 2000 г.

На рис. 38 показан рост числа автомобилей к 2040 г., которое достигнет величины около 2 млрд, из которых около 1,8 млрд. будет приходиться на авто с ДВС, а остальные авто в количестве 250 млн. авто будут распределены примерно одинаково между гибридными и полностью батарейными авто.

¹¹⁰BP p.l.c., 2018 BP Energy Outlook, 2018.

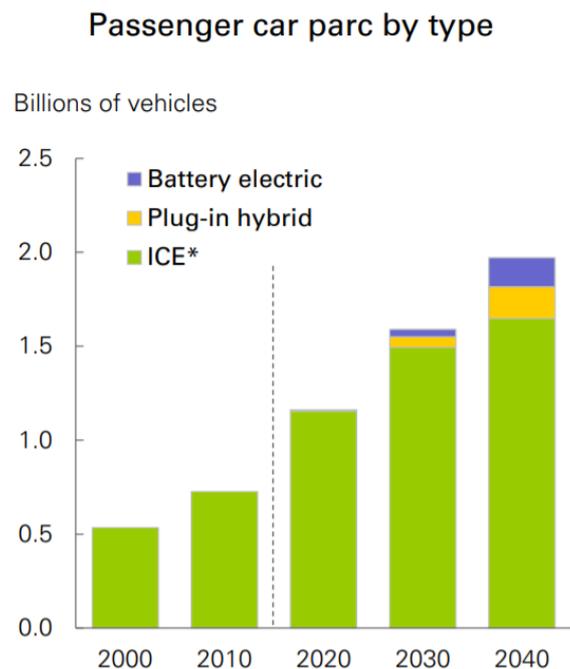


Рис. 38. Прогноз мирового парка легковых автомобилей по оценкам компании ВР

В сценарии ЕТ предполагается, что к 2030 г. доля продаж батарейных электромобилей составит около 30%, увеличиваясь до 67% к 2035 г. и 100% к 2040 г. Введение запрета на новые продажи авто с ДВС после 2040 г. приведет к снижению темпов роста спроса на нефтетоплива в транспортном секторе на 10 млн. барр./сут (примерно 500 млн. т в год), однако общий спрос на нефтетоплива в этом секторе останется все же выше, чем в 2016 г.

- Прогнозы компании EnderData.¹¹¹ Основываясь на последнем обновлении своих долгосрочных прогнозов EnerFuture (январь 2018 года), доля электромобилей в общем глобальном автопарке может достигнуть 44% в 2040 г. и более 50% к 2050 г. Эти уровни достигнуты в сценарии в наиболее экологически ориентированном сценарии Ener-Green (сильная декарбонизация, совместимая с ограничением роста температуры +2°C); в умеренном сценарии Ener-Blue (умеренная декарбонизация в соответствии с данными Парижской конференции по климату в декабре 2015 г., гарантирующая достижение потепления до + 4°C) эта доля достигает 24% в 2040 г. и 33% в 2050 г. В 2016 г. с 2 миллионами электромобилей доля электромобилей в общем объеме автомобильный парк достигла всего лишь 0,2%. Сокращение расходов нефти к 2040 г. при реализации этих двух сценариев составит 8,2 млн. барр./сут (410

¹¹¹EnderData (2018), EnerFuture World Energy Scenarios to 2040, 14 March 2018, <https://eneroutlook.enderdata.net>

млн. т/год) в сценарии EnerBlue и 12,9 мдн. барр./сут. (1,15 млрд. т/год) в сценарии EnerGreen (рис. 39).

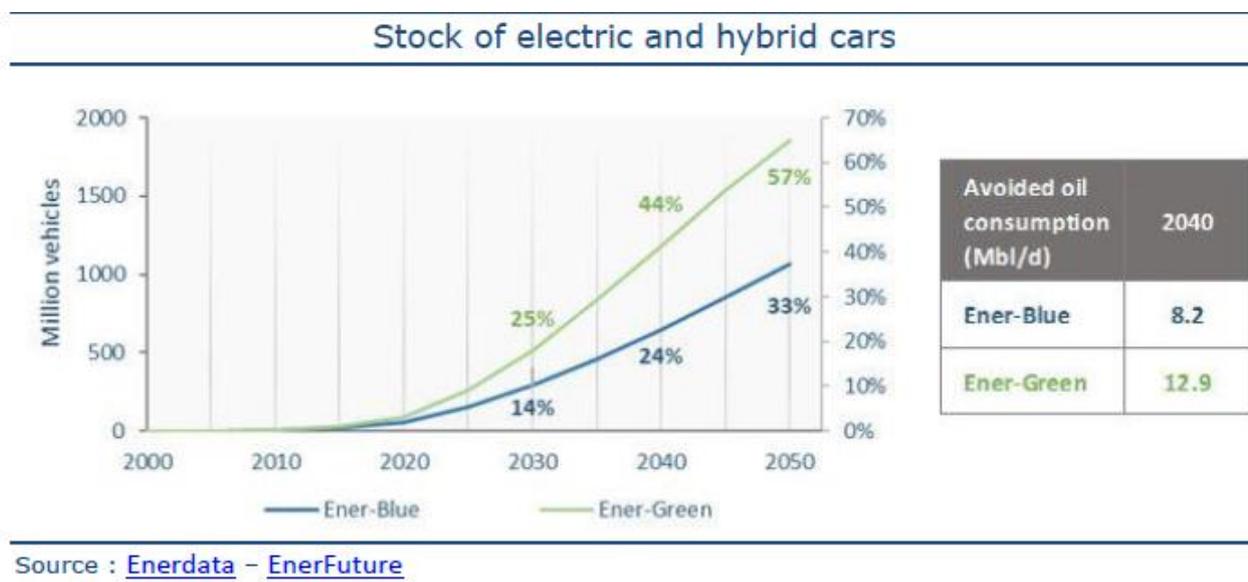


Рис. 39. Прогнозы доли электромобилей до 2050 г. в двух сценариях EnerData

Такое проникновение электромобилей окажет значительное влияние на развитие электроэнергетики (генерирование электроэнергии, магистральный транспорт и сетевое хозяйство). Согласно прогнозам Enerdata, спрос на электроэнергию в электромобилях составит 7% от общего увеличения потребления электроэнергии в мире в период между 2016 и 2030 гг. МЭА считает, что такое развитие электромобилей с неуправляемой зарядкой может привести к увеличению пикового спроса на 30%. В сценарии с допустимым ростом температуры до +2 °С (Ener-Green) в середине текущего столетия в секторе производства электроэнергии должны пройти глубокие изменения: удельные выбросы энергетического сектора должны быть сокращены на -71% в глобальном масштабе с ключевой ролью для биомассы, ветра и технологий улавливания и захоронения углерода.

Использованная литература

1. J.D.Power&Associates. Drive Green 2020: More Hope than Reality? Nov. 2010.
2. 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.
3. Bickel P., Friedrich R.ExternEExternalitiesof Energy Methodology 2005 Update // Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Germany, 2005.
4. 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.
5. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. Официальное издание. М., 1994.
6. Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. Life Cycle Engineering Guidelines. EPA/600/R-01-101, 2001.
7. 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.
8. Sonnemann, G., et al. Integrated Life-Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes. CRC Press, 2003.
9. ExternE. Externalities of Energy, European Commission, Directorate General XII, Science, Research and Development, Luxembourg, 1995.
10. 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.
11. External Costs. Research Results on Socio-Environmental Damages due to Electricity and Transport, European Commission, EUR 20198, 2003.
12. OECD, Nuclear Energy Agency. Externalities and Energy Policy. The Life Cycle Analysis Approach, Workshop Proc., Paris, France, 2001.
13. <http://www.iea.org/statistics/relatedsurveys/monthlyenergyprices/>
14. IEA. Monthly Energy Prices Statistics, OECD/IEA, 2015.
15. Синяк Ю.В., Колпаков А.Ю.Эффективность производства синтетических моторных топлив из природного газа, Проблемы прогнозирования, № 1, 2012.
16. IEA/OECD Energy Prices and Taxes, Part III, 2014
17. The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation (GREET) Model, Transportation Technology R&D Center, <http://www.transportation.anl.gov/software/GREET/>
18. BP Energy Outlook 2035, Feb. 2015.
19. ExxonMobil. The Outlook for Energy^ a View to 2040, 2015.
20. IEA. World Energy Outlook 2014, Nov. 2014.

21. 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., ИПП РАН, Москва, 2009.
22. 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.
23. Rabl A., Spadaro V. Health Costs of Automobile Pollution, *Revue Française d'Allergologie et d'Immunologie Clinique*, vol. 40(I), 2000, pp. 55-59.
24. 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.
25. Todd Litman, *Transportation Cost and Benefit Analysis. Techniques, Estimates and Implications*, Victoria Transport Policy Institute, 17 May 2007.
26. Todd Litman (2012). *Climate Change Emission Valuation for Transportation Economic Analysis*. Victoria Transport Policy Institute, http://www.vtpi.org/ghg_valuation.pdf
27. 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.
28. Sperling D., Gordon D. *Two billion cars: driving toward sustainability*. Oxford University Press, New York], 2009.
29. Navigant Research. *Executive Summary: Transportation Forecast: Light Duty Vehicles. Light Duty Stop-Start, Hybrid Electric, Plug-In Hybrid Electric, Battery Electric, Natural Gas, Fuel Cell, Propane Autogas, and Conventional Vehicles: Global Market Forecasts, 2015-2035*. Published 2Q 2015.
30. U.S. Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics, *Transportation Statistics Annual Report 2013* (Washington, DC: 2014).
31. <http://carros.uol.com.br/noticias/redacao/2013/06/28/brasil-chega-aos-20-milhoes-de-motores-flex-diz-anfavea.htm>
32. Росстат. *Транспорт и связь в России, Статистический сборник*, Москва, 2014
33. https://en.wikipedia.org/wiki/Motor_vehicle
34. *Influence on the Low Carbon Car Market from 2020-2030. Final Report*. Element Energy, July 2011
35. <http://www.smmt.co.uk/wp-content/uploads/sites/2/SMMT-2013-Motor-Industry-Facts-guide.pdf?9b6f83>; <http://www.fueleconomy.gov>
36. EPA, *Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 Through 2013*, Dec. 2013
37. <http://avtomarket.ru/catalog/>
38. <http://www.autoprice.eu>
39. Gillespie, Th. *Fundamentals of Vehicle Dynamic*, SAE International, 1999.
40. MIT. *In the Road in 2035*, 2008.
41. Lotus Engineering Inc. *An Assessment of Mass Reduction Opportunities*, 2010.
42. www.automobile-catalog.com

43. The King Review of Low-Carbon Cars, King Review 2007
44. Tank to Wheels, Appendix 1, Concawe 2008, Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options, EPRI 2001;
45. Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options for Compact Sedan and Sport Utility Vehicles, EPRI 2002
46. CONCAWE/EUCAR/JRC, Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context , 2007
47. McKinsey Co. A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis, 2010
48. www.afdc.energy.gov/calc/; www.fueleconomy.gov/feg/find.do
49. EVT – Electric Vehicle Transportation Center. Electric Vehicle Life Cycle Cost Assessment, Sept. 2014
50. Björn Nykvist&Måns Nilsson (2015) “Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles” Nature Climate Change 5, 329–332 doi:10.1038/nclimate2564
51. 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
52. http://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
53. http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/forecast-2030--stored-electricity-at-005-kwh_100016581/
54. <http://www.azonano.com/news.aspx?newsID=32513>
55. <http://cleantechnica.com/2015/09/21/bosch-solid-state-lithium-ion-batteries-could-hit-ev-market-within-5-years/>
56. <http://www.greenbiz.com/blog/2013/01/17/how-important-charging-infrastructure-ev-adoption>; <http://www.caranddriver.com/volkswagen/e-golf>
57. <http://cleantechnica.com/2015/09/26/epa-ratings-published-for-tesla-model-x/>
58. <http://unstats.un.org/unsd/energy/balance/>
59. <http://www.c2es.org/docUploads/HydrogenFuelCellVehicles.pdf>,
60. www.afdc.erngy.gov/calc/
61. <http://decarboni.se/sites/default/files/publications/15686/ccs-roadmap-industry-high-purity-co2-sources-sectoral-assessment.pdf>
62. Schultz K., Use of the Modular Helium Reactor for Hydrogen Production, World Nuclear Association Annual Symposium, London, 3-5 September 2003, <http://www.world-nuclear.org/sym/2003/pdf/schultz.pdf>
63. Levene M., Mann K., Margolis R., Milbrandt A., An Analysis of Hydrogen Production from Renewable Electricity Sources, Preprint J.I. National Renewable Energy Laboratory Prepared for ISES 2005 Solar World Congress Orlando, Florida August 6-12, 2005

64. Simbeck D., Chang E., Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways. Scoping Analysis, SFA Pacific, Inc. Mountain View, California, January 22, 2002 – July 22, 2002, <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32525.pdf>
65. Padró C.E.G. and Putsche V. Survey of the Economics of Hydrogen Technologies, NREL, September 1999, <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/27079.pdf>
66. Brown L. C., Besenbruch G. E., Funk J. E., Marshall A.C., Pickard P.S., Showalter S.K., High Efficiency Generation of Hydrogen Fuels Using Nuclear Energy, A Nuclear Energy Research Initiative (NERI), Project for the U.S. Department of Energy, Hydrogen and Fuel Cells Annual Review, 6 May 2002 <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/32405d.pdf>
67. Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis, Ver. 8.0, Sept. 2014
68. Henderson B., The Experience Curve, 1974, <https://gsbapps.stanford.edu/researchpapers/library/RP641.pdf>
69. Simbeck D., Chang E., Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways. Scoping Analysis, SFA Pacific, Inc. Mountain View, California, January 22, 2002 – July 22, 2002, <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32525.pdf>
70. Amos W., Costs of Storing and Transporting Hydrogen, National Renewable Energy Laboratory, November 1998, <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/25106.pdf>
71. Hydrogen Pipelines. HyWeb, 18 Dec. 2002, Ludwig-Boelkow-Systemtechnik GmbH/German Hydrogen Ass., www.hydrogen.org/News/arcv402e.html#LBST%20Analysis%202002-12-18.
72. Lovins A. Twenty Hydrogen Myths, Rocky Mountain Institute, 20 June 2003, updated 17 June 2005.
73. Wilson J. The Truth about Hydrogen. A Response to Amery Lonins' "Twenty Hydrogen Myths", Sept. 25, 2003.
74. USDRIVE. Fuel Cell Technical Team Roadmap, June 2013 (energy.gov/sites/.../fctt_roadmap_june2013.pdf)
75. http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/10004_fuel_cell_cost.pdf
76. US DOE. An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities. Quadrennial Technology Review, Sept. 2015
77. http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv_challenges.shtml, <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>, <http://www.c2es.org/technology/factsheet/HydrogenFuelCellVehicles>
78. 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-ejournal.ja.2012-10>)
79. ICCT (The International Council on Clean Transportation), European Vehicle Market Statistics, Pocketbook 2017/2018.
80. IEA, Global EV Outlook 2018, <https://www.iea.org/gevo2018/>
81. Ehsani M., Gao Y., Gay V., Emadi A. Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Fundamentals, Theory, and Design, CRC Press, 2004.

82. IRENA, The Cost of Renewable Solutions, 2013.
83. US DOE. Fuel Cell Technologies Market Report, 2016.
84. Global Trend and Outlook for Hydrogen. IEA Hydrogen, Dec. 2017.
85. European Automobile Manufacturers Association. The Automobile Industry Pocket Guide, 2017-2018.
86. BNEF (Bloomberg New Energy Finance). Electric Vehicle Outlook 2017, July 2017.
87. Синяк Ю.В., Петров В.Ю. Прогнозные оценки стоимости водорода в условиях его централизованного производства, Проблемы прогнозирования, 2008, № 3.