Воробьев С. А.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА НА АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Монография

С. А. Воробьев

Перспективы развития автомобильного транспорта на альтернативной энергетике

Монография

Электронное текстовое издание

Санкт-Петербург
Наукоемкие технологии
2023

© Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет, 2023
ISBN 978-5-907618-52-7

УДК 629.33
ББК 39.33
В75

Рецензенты:
к. т. н, доцент *Николай Артемьевич Давыдов*;
к. т. н. *Евгений Владимирович Лаврентьев*

Воробьев, С. А.
В75 Перспективы развития автомобильного транспорта на альтернативной энергетике [Электронный ресурс]. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2023. – 122 с. – URL: https://publishing.intelgr.com/archive/perspektivy-razvitiya-avtotransporta.pdf.

ISBN 978-5-907618-52-7

В монографии отражены конструктивные и эксплуатационные преимущества и недостатки средств индивидуальной мобильности (BEV, FCEV и ТС ДВС). Определена степень готовности инфраструктуры и планы по ее модернизации как производной, оказывающей влияние на развитие (BEV, FCEV). Произведен анализ природных ресурсов, необходимых для повышения уровня автомобилизации (BEV, FCEV). Уделено внимание проблеме преобразования и хранения энергии, что во многом определяет перспективы развития автомобильного транспорта на альтернативной энергетике.

УДК 629.33
ББК 39.33

ISBN 978-5-907618-52-7

© Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2023

Учебное издание

Воробьев Сергей Александрович

Перспективы развития автомобильного транспорта на альтернативной энергетике

Монография

Электронное текстовое издание

Подписано к использованию 7.04.2023.
Объем издания – 4,5 Мб.

Издательство «Наукоемкие технологии»
ООО «Корпорация «Интел Групп»
https://publishing.intelgr.com
E-mail: publishing@intelgr.com
Тел.: +7 (812) 945-50-63

ISBN 978-5-907618-52-7



Оглавление

Список сокращений 5
Введение 7
1. Легковые автотранспортные средства 9
1.1. Транспортные средства с двигателем внутреннего сгорания (ТС ДВС) 12
1.2. Транспортные средства на основе аккумуляторных батарей (BEV) 17
1.3. Транспортные средства на основе топливных элементов (FCEV) 23
1.4. Оценка затрат на зарядные станции BEV и пункты заправки FCEV водородом 26
1.5. Отступление. Выбросы за срок службы и доступность важного сырья 29
1.5.1. Анализ жизненного цикла 31
1.5.2. Доступность материалов 35
2. Преобразование энергии 48
2.1. Возобновляемые источники энергии 48
2.1.1. Солнечная энергия 48
2.1.2. Ветровая энергия 52
2.2. Выработка тепловой энергии 55
2.2.1. Нагрев путем сжигания ископаемых видов топлива 55
2.2.2. Нагревание электричеством, Power2Heat 57
2.3. Получение водорода 62
2.3.1. Метод электролиза 62
2.3.2. Протонообменный водородный топливный элемент, питаемый водородом 68
2.3.3. Power2Gas (P2G) 71
3. Хранение энергии 75
3.1. Аккумулирование тепла 76
3.2. Хранение электрической энергии 77
3.2.1. Vehicle2Grid (V2G) 77
3.2.2. Домашние батарейные системы 79
3.3. Хранение водорода 81
3.3.1. Хранение сжатого газообразного водорода 82
3.3.2. Хранение жидкого водорода 87
Заключение 92
Список литературы 94

Список сокращений

ACEA	Ассоциация европейских производителей автомобилей
AEL	Щелочной электролизер
BEV	Электрическое транспортное средство на основе аккумуляторных батарей
CA	Калифорния
DE	Германия
E10	Бензин марки E10, также называют «бензоспиртовая топливная смесь» – смесь одной части этилового спирта с девятью частями неэтилированного бензина, см. [338]
EIA	Управление США по энергетической информации (www.eia.gov)
EPA	Агентство США по охране окружающей среды
FCEV	Электрическое транспортное средство на основе топливного элемента
HTSOE	Высокотемпературный твердооксидный электролизер
KOH	Гидроксид калия
LAH	г. Лос-Альтос-Хиллз, штат Калифорния, США
LIN	г. Ликольн, штат Калифорния, США
LMO	Оксид литий-марганец
NCA	Оксид литий-никель-кобальт-алюминия
NEU	г. Ноймаркт-ин-дер-Оберпфальц, Германия
NMC	Оксид никель-марганец-кобальт
P2G	Система Power2Gas, («энергия в газ») – подача водорода в сеть распределения природного газа
P2H	Система Power2Heat, («энергия в тепло»)
PbA	Свинцово-кислотная аккумуляторная батарея
PEMEL	Электролизер на основе протонообменной мембраны
PEMFC	Топливный элемент с протонообменной мембраной
PHEV	Подзаряжаемое гибридное электрическое транспортное средство
PUT	г. Пуцбрунн, Германия
SMR	Конверсия метана с водяным паром
STC	Стандартные условия испытания согласно DIN EN 60904-3 [172]
TTW	Цикл «от скважины до колес»
V2G	Vehicle2Grid
WTT	Цикл «от скважины до бака»
WTW	Цикл «от скважины до колес», WTW = WTT + TTW

ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
гH_2	Газообразный водород
ДЭ США	Департамент энергетики США
жH_2	Жидкий водород
ЛИБ	Литий-ионные батареи
ПБ	Плоскость батареи
ПГ	Природный газ
РЗЭ	Редкоземельные элементы
сгH_2	Сжатый газообразный водород
СВТВ	Совместная выработка тепла и водорода
СНГ	Сжиженный нефтяной газ
ТС ДВС	Транспортные средства с двигателем внутреннего сгорания
ЭТС	Электрическое транспортное средство

Постоянные и химические формулы

$(CH_2O)_2CO$	этиленкарбонат	-
$C_{12}H_{26}$	додекан	-
C_8H_{18}	октан	-
$CH_3C_2H_3O_2CO$	пропиленкарбонат	-
CO_2	углекислый газ	-
C	углерод	-
$OC(OCH_3)_2$	диметилкарбонат	-
Si	кремний	-
$MC_{12}H_{26}$	Молярная масса додекана M_{C12H26} = 170,3 г/моль	г/моль
MC_8H_{18}	Молярная масса октана M_{C8H18} = 114,2 г/моль	г/моль
MCO_2	Молярная масса углекислого газа M_{CO2} = 44,0 г/моль	г/моль

Введение

В монографии изложены подробные сведения о технологиях, рассматриваемых в настоящем исследовании, а также приводятся исходные параметры, использованные в системе моделирования для получения результатов. Обзор всех вариантов технологических решений и их возможных взаимодействий показан на рисунке 1.1.

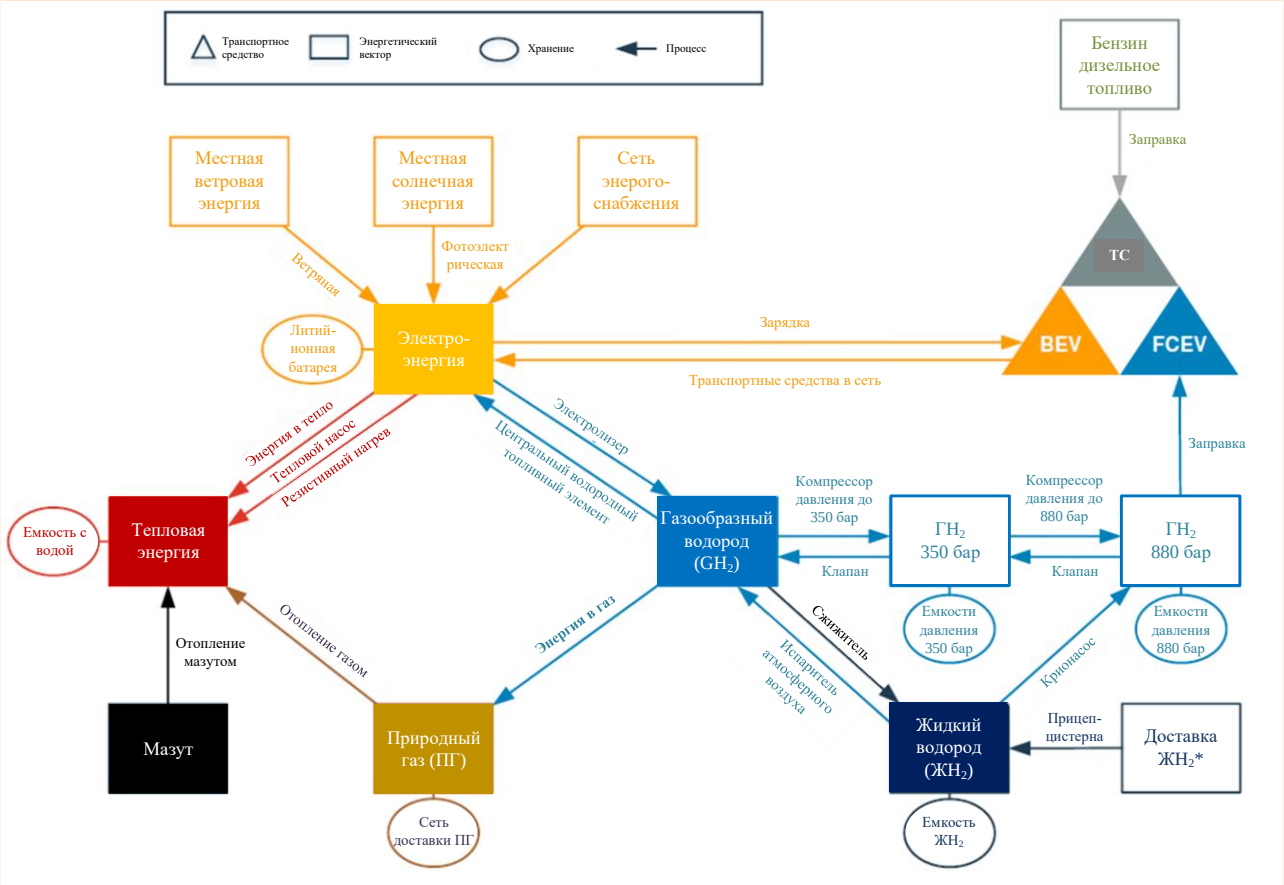


Рисунок 1.1. Общая схема вариантов технологических решений и видов взаимодействия, рассмотренных в настоящей работе. (*) Ввоз водорода в регион путем доставки $жН_2$ по умолчанию недоступен, эта возможность рассматривается только для сценария импорта $жН_2$

В первом разделе раскрываются различия между ТС на аккумуляторных батареях, топливных элементах и двигателях внутреннего сгорания (BEV, FCEV и ТС ДВС), задействованных в транспортном секторе. Следующий раздел 2 посвящен доступным технологиям преобразования энергии, таким как

солнечные панели, ветряные энергетические установки, электролизеры и системы нагревания, обеспечивающим энергетические потребности регионов. В третьем разделе рассмотрены дополнительные технологии хранения энергии.

Каждый вид технологий описывается в отдельном подразделе. Там же приведены исходные параметры, использовавшиеся в системе моделирования.

1. Легковые автотранспортные средства

Через два столетия с момента изобретения ТС ДВС, работающего на водороде (1807 г.) и выхода на дорогу первого BEV в 1835 г. [13] водород и аккумуляторные батареи делают вторую попытку стать основным способом хранения энергии для легковых автотранспортных средств. Различия двигательных систем, проистекающие из отличий электродвигателей от двигателей внутреннего сгорания, представлены на рисунке 1.2.

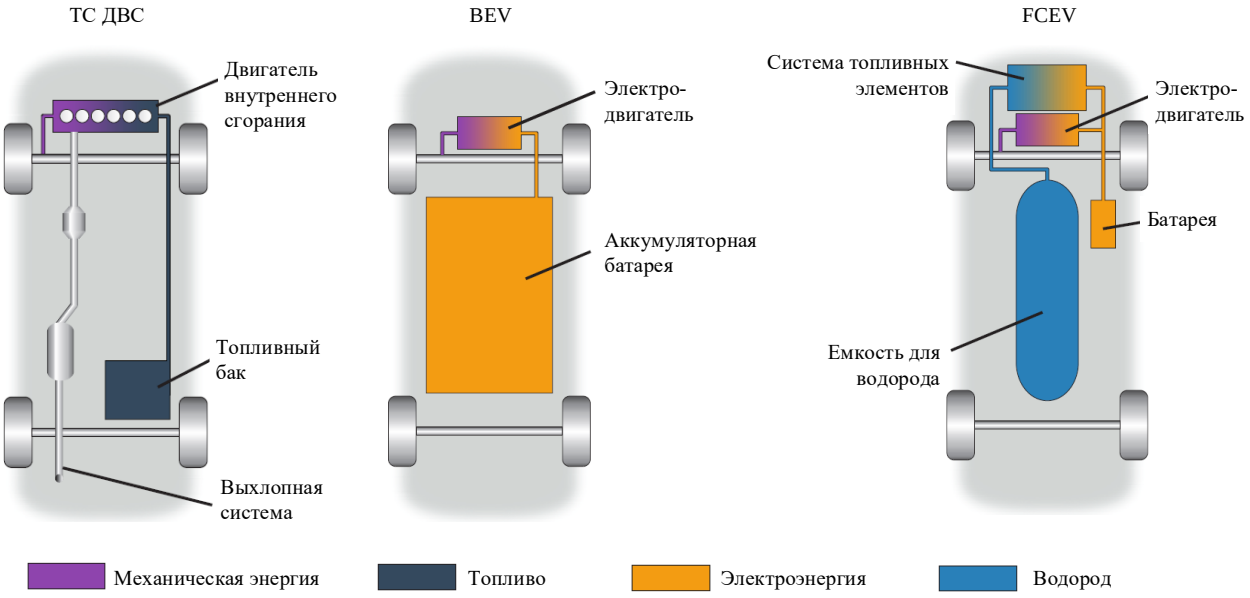


Рисунок 1.2. Силовой агрегат и система хранения энергии ТС ДВС, BEV и FCEV

Преимущества электрических средств обеспечения мобильности для природной среды вследствие отсутствия выбросов, а также снижения потребностей в (ограниченных) ископаемых ресурсах очевидны. Однако для людей переход от ТС ДВС к BEV или FCEV все еще сопряжен с существенным изменением привычек, которое в основном связано с разницей в дальности пробега (для BEV и FCEV), времени зарядки (BEV), а также с вопросами наличия инфраструктуры заправки и зарядки (BEV и FCEV).

Дальность пробега до зарядки (заправки)

Автовладельцы привыкли к пробегу до 1 000 км после заправки. Дальность пробега электрических ТС остается основной проблемой при принятии решения о приобретении ЭТС [14]. Ввиду меньшей энергоемкости аккумуляторных батарей по сравнению с системами хранения водорода владельцы BEV чаще испытывают чувство тревоги, связанное с дальностью пробега, чем водители FCEV [15]. Тогда как FCEV способны покрывать расстояния до 400–450 км (в реальных условиях) на одной заправке, большинство современных моделей BEV обеспечивают дальность пробега менее 200 км. Однако принимая во внимание, что аккумуляторная батарея является основной составляющей стоимости ТС [16, 17] и что некоторые модели верхнего ценового сегмента уже покрывают (в реальных условиях) расстояния более 400 км, дальность пробега является скорее экономической, а не технической проблемой. По мере дальнейшего снижения цен на литий-ионные батареи [18] ожидается, что BEV, обеспечивающие большие дистанции пробега, станут доступны в более экономичных сегментах [19, 20].

Время зарядки

В отношении зарядки BEV требуют от своих владельцев гораздо больше терпения по сравнению с временем заправки ТС ДВС и FCEV. Станции быстрой зарядки (мощностью 50–120 кВт) обеспечивают за минуту заряд на пробег в 4–9 км, тогда как за это же время ТС ДВС можно заправить для пробега на несколько сот километров (300–700 км/мин). Скорость заправки FCEV имеет тот же порядок величин (140–170 км/мин, см. рис. 1.5).

Заправка бензином или водородом – это процесс физического переноса ранее подготовленного энергоносителя, и, следовательно, она не ограничена электрохимическими реакциями, как в случае зарядки литий-ионной батареи [21–24]. Быстрая зарядка аккумуляторных батарей на мощности около 300 кВт позволит BEV сократить это отставание (до 25 км/мин), однако это станет возможным не ранее 2025–2027 гг., когда ожидается появление первых моделей

ТС, использующих соответствующую технологию [25]. Вывод: FCEV уже обеспечивают время заправки на уровне ТС ДВС, тогда как время зарядки будет оставаться существенным недостатком BEV в обозримом будущем.

Инфраструктура зарядки (заправки)

В начале 1888 года Берте Бенц пришлось «заправлять» первый автомобиль, оборудованный двигателем внутреннего сгорания, в аптеке [26, 27], а сегодня ТС ДВС можно заправить на более чем 10 000 заправочных станциях в Калифорнии и Германии. Система распределения водорода, напротив, достаточно слаборазвита – в обоих случаях имеется около 20 мест заправки [28, 29]. Заправочная инфраструктура остается одной (и, вероятно, самой большой) из проблем, препятствующих успешному распространению FCEV, ввиду необходимости развертывания сотен дополнительных водородных заправочных станций задолго до того, как количество ТС станет достаточно большим, чтобы их работа стала окупаться. Только в Германии расчетный объем инвестиций на строительство 400 водородных заправочных станций составляет 400 млн € (≈ 460 млн $) [30].

Инфраструктура станций зарядки BEV имеет схожие перспективы: с одной стороны, инфраструктура станций (быстрой) зарядки остается основополагающим требованием для обеспечения возможности путешествовать на далекие расстояния и для того, чтобы убедить больше людей приобрести такие автомобили с целью обеспечить существенный темп их внедрения на рынок [31, 32]. С другой стороны, зарядные станции в обозримом будущем приносить доход не будут [31], поэтому убедить поставщиков электроэнергии и инвесторов вложить средства в их строительство будет непросто. При этом BEV обладают тем важным преимуществом, что их можно заряжать (в режиме медленной зарядки) практически в любом месте, подключенном к системе электроснабжения. К примеру, зарядка дома составляет 80 % от всех случаев зарядки этих ТС. При этом, к тому же, устраняется необходимость добираться до зарядной станции [33, 34].

И BEV, и FCEV стоят дороже, чем сравнимые традиционные транспортные средства (таблица 1.1). Этот разрыв должен снижаться по мере введения все более строгих стандартов экономии топлива и выбросов и соответственного повышения стоимости ТС ДВС, а также снижения цен на BEV и FCEV вследствие экономии за счет масштабов производства и роста общемировых показателей их продаж с текущего значения в 150 000 BEV в год (на 2015 г.) [35] до нескольких миллионов единиц в год.

Таблица 1.1. Исходные параметры для расчета цен на С ДВС, BEV и FEV

Стоимость транспортного средства	inv-cost ТС ДВС (DE)	inv-cost BEV (DE)	inv-cost FCEV (DE)	inv-cost ТС ДВС (CA)	inv-cost BEV (CA)	inv-cost FCEV (CA)	Срок эксплуатации
2015	28 800	49 500	61000	25000	43000	53000	12
2025	31600	44900	56400	27500	39000	49000	
2035	31600	42600	51800	27500	37000	45000	

Источники: Цены на ТС ДВС в 2015–2035 гг. для CA основаны на прогнозах, сделанных в Ежегодном энергетическом прогнозе – 2015 [11, стр. 11]. Стоимость FCEV на 2015 г. основана на рекомендованной производителем розничной цене электромобиля Toyota Mirai® на уровне 57 500 долл. [36, 37]. Было принято допущение, что цены на FCEV последуют прогнозу, сделанному для BEV, с пятилетней задержкой вследствие более позднего выхода FCEV на рынок. Для целей сравнения цены на транспортные средства в Германии были рассчитаны путем умножения цен в CA на коэффициент $Z = \beta^{inv}(DE)/\beta^{inv}(CA)$, рассчитанный на основе цен на новые автомобили в DE $\beta^{inv}(DE)$ и CA $\beta^{inv}(CA)$. Значение коэффициента $Z \approx 115$ % было рассчитано на основе [38, 39]. Следует отметить, что этот подход действует скорее в пользу FCEV в Германии, так как текущие цены выше американских не на 15 %, а более чем на 50 %. Так, в США цены на Toyota Mirai® и Hyundai ix35 Fuel Cell® составляют 85 000–90 000 долл. [40, 41]

1.1. Транспортные средства с двигателем внутреннего сгорания (ТС ДВС)

Сжигание углеводородных видов топлива определило развитие истории автотранспорта с момента изобретения автомобиля Benz Motorwagen в 1886-м [27, 44]. Любопытно, что Франсуа Исаак де Риваз изобрел двигатель внутреннего сгорания, работающий на водороде, почти за 80 лет (в 1807 г.) до открытия, совершенного Карлом Бенцем [45–47]. Без сомнения, одной из основных причин, по которым (жидкие) углеводородные виды топлива

снискали большую популярность, чем (газообразный) водород, было большее удобство транспортировки первых.

Таблица 1.2. Исходные параметры для ТС ДВС

ТС ДВС	Парк ТС в DE	Потребление в DE	Выбросы TTW CO_2 в DE	Парк ТС в CA	Потребление в CA	Выбросы TTW CO_2 в CA
	dg/d_g	fg/f_d		dg/d_g	fg/f_d	
	%	l/100 км	g_{co2}/км	%	l/100 км	g_{co2}/км
2015	66 / 34	8,0 / 7,2	192 / 170	90 / 10	10,2 / 9,2	272 / 195
2025	55 / 45	6,4 / 5,8	155 / 136		8,2 / 7,4	219 / 157
2035	45 / 55	5,1 / 4,6	123 / 108		6,9 / 6,2	184 / 131

Источники: структура парка ТС в Калифорнии была рассчитана на основе соотношения бензиновых и дизельных автомобилей в США [42]. Принято допущение, что эта структура останется без изменений в течение периода 2015–2035 гг. Расчеты структуры парка автомобилей в Германии основаны на данных, опубликованных компанией Exxon® [43]. Расчет потребления бензина в Калифорнии основан на линейной интерполяции показателя «средняя экономия топлива парком пассажирских транспортных средств» за период 2013–2040 гг., приведенного в Ежегодном энергетическом прогнозе – 2015 [11]. Расчет потребления бензина в Германии основан на [9]. Расчеты потребления дизельного топлива основаны на допущении, что дизельные ТС потребляют на 10 % меньше топлива с учетом удельной энергии на единицу объема (таблица 1.3). Выбросы углекислого газа рассчитаны с использованием подхода, изложенного в данном разделе

Сегодня, через 130 лет после создания Benz Motorwagen, сопровождающие процесс сгорания выбросы (углекислый газ, оксиды азота, взвешенные частицы) находятся в центре общественного внимания. Они стали причиной введения странами по всему миру все более строгих экологических стандартов. Вследствие самой природы горения топлива полностью устранить выбросы не представляется возможным. Можно только ограничить их влияние путем повышения топливной экономичности ТС ДВС. Ожидается, что к 2035 г. продолжающиеся усилия по достижению этой цели приведут к снижению среднего потребления топлива парком ТС ДВС на треть по сравнению с сегодняшним днем (рис. 1.3). Это станет причиной такого же снижения объемов выбросов углекислого газа транспортным сектором, так как эти выбросы есть результат сжигания углеводородов в процессе эксплуатации ТС.

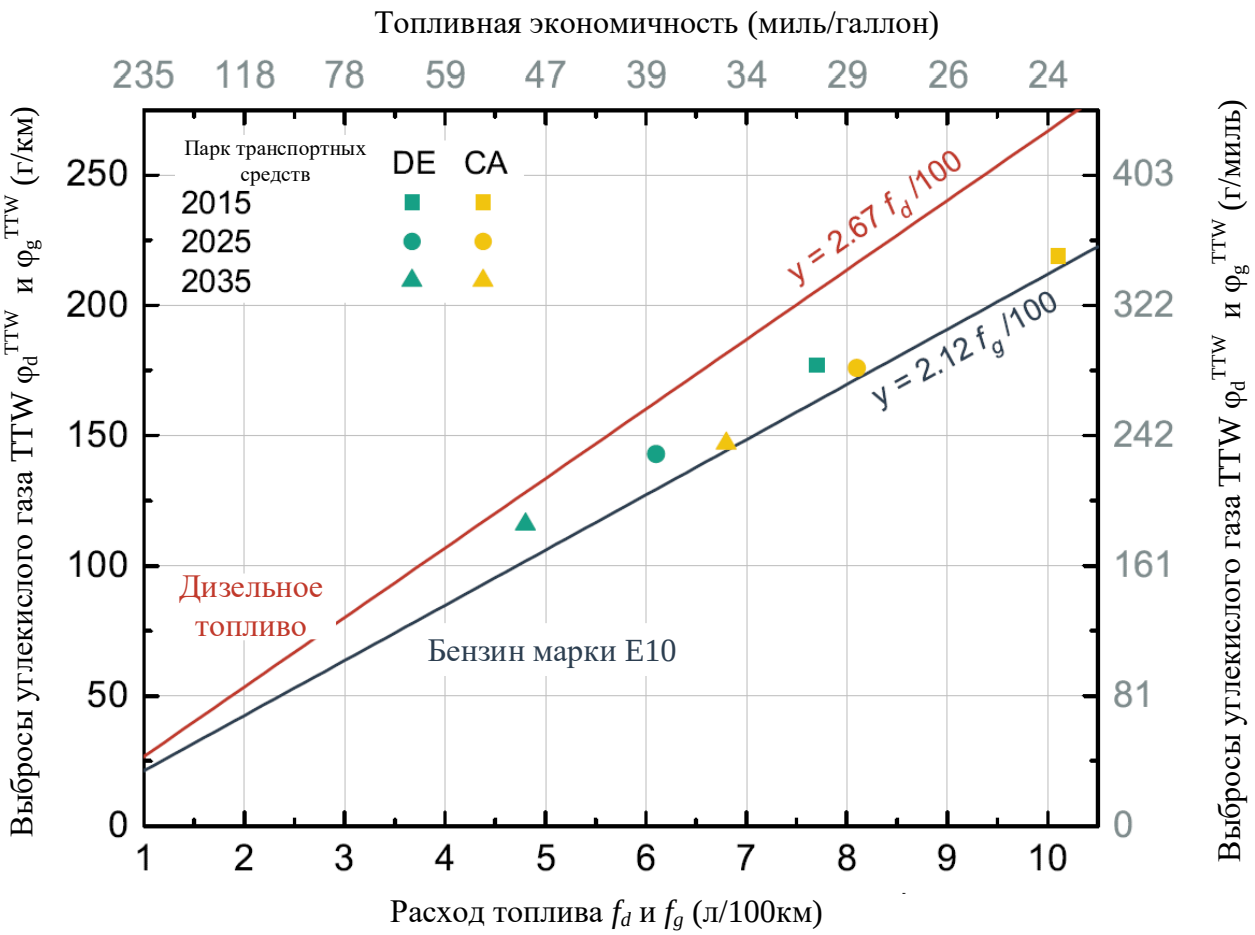


Рисунок 1.3. Расход топлива и соответствующие выбросы углекислого газа TTW парка ТС ДВС (бензиновых и дизельных, см. таблицу 1.2) в DE и CA. Две кривые графика основаны на данных о выбросах углекислого газа TTW при использовании бензина марки E10 и дизельного топлива (таблица 1.3)

Таблица 1.3. Исходные параметры для топлива ТС ДВС.

В расчетах АТС используются бензин и дизельное топливо марки E10

	Энергоемкость	Массовая плотность, ρ	Выделение CO_2
	кВт/ч/л	кг/л	кг/л
Дизельное топливо	9,87	0,82	2,67
Бензин	9,10	0,75	2,33
Бензин марки E10	8,70	0,76	2,12

Взаимозависимость потребления топлива и выбросов углекислого газа в разрезе вида топлива кратко раскрывается на основе статьи, опубликованной Оливер-Хойо и Пинто [48].

Уравнение 1.1 описывает (идеальный) процесс сгорания углеводородного топлива C_xH_y.

$$C_xH_y + \left(x + \frac{y}{4}\right) O_2 \rightarrow xCO_2 + \frac{y}{2} H_2O \quad (1.1)$$

Для целей выполнения расчетов бензин и дизельное топливо сведены к октану C_8H_{18} и додекану $C_{12}H_{26}$ соответственно. На основе этих допущений выработаны следующие уравнения.

Бензин: $1C_8H_{18} + 12.5\ O_2 \rightarrow 8CO_2 + 9H_2O$

Дизельное топливо: $1C_8H_{18} + 12.5\ O_2 \rightarrow 8CO_2 + 9H_2O$ (1.2)

Из уравнений (1.2) следует, что молярное соотношение[1] r_{mole} (−) между CO_2 и C_xH_y в этих реакциях эквивалентно количеству атомов углерода x в соответствующем виде углеводородного топлива.

$$r_{mole} = x\ mol \frac{CO_2}{1} mol\ C_xH_y = x \quad (1.3)$$

С учетом массовой плотности бензина ρ_g (кг/л) и дизельного топлива ρ_d (кг/л) (таблица 1.3) это соотношение позволяет определить количество CO_2, выделяемого на один литр потребленного топлива $\varphi_{g/d}$ (кг/л) и $\varphi_{g/d}$ (кг/л), с помощью уравнений (1.4).

$$\Phi_g(kg/l) = \rho_g(kg/l) \cdot r_{mole} \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{C_8H_{18}}}$$

$$\Phi_d(kg/l) = \rho_d(kg/l) \cdot r_{mole} \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{C_{12}H_{26}}} \quad (1.4)$$

[1] Соотношение между количеством получаемого продукта (CO_2) и количеством веществ, участвующих в реакции (C_xH_y).

Решение уравнений выполняется при данных молярных массах M_{C8H18} = 114 г/моль, M_{C12H26} = 170 г/моль, M_{CO2} = 44 г/моль соответствующих веществ:

Бензин:

$$\Phi_g = \frac{750\ \mathrm{g\ C_8H_{18}}}{1\mathrm{l}} \times \frac{8\ \mathrm{mol\ CO_2}}{1\ \mathrm{mol\ C_8H_{18}}} \times \frac{44\ \mathrm{g\ CO_2}}{1\ \mathrm{mol\ CO_2}} / \frac{114\ \mathrm{g}}{1\ \mathrm{mol\ C_8H_{18}}} = 2.31\ \mathrm{kg_{CO_2}}/l$$

Дизельное топливо:

$$\Phi_d = \frac{820\ \mathrm{g\ C_{12}H_{26}}}{1\mathrm{l}} \times \frac{12\ \mathrm{mol\ CO_2}}{1\ \mathrm{mol\ C_{12}H_{26}}} \times \frac{44\ \mathrm{g\ CO_2}}{1\ \mathrm{mol\ CO_2}} / \frac{170\ \mathrm{g}}{1\ \mathrm{mol\ C_{12}H_{26}}} = 2.54\ \mathrm{kg_{CO_2}}/l \qquad (1.5)$$

Полученные значения очень хорошо коррелируют с официальными данными Службы энергетической информации США (φ_g = 2,35 $кг_{CO2}$/л; φ_d = 2,68 $кг_{CO2}$/л [49]) и Ассоциации европейских производителей автомобилей (ACEA, φ_g = 2,30 $кг_{CO2}$/л; φ_d = 2,65 $кг_{CO2}$/л [50]). В имитационной модели принято, что вместо обычного используется бензин марки E10 (90 % бензина и 10 % этилового спирта), дающий меньшие объемы выбросов углекислого газа φ_g = 2,12 $кг_{CO2}$/л (EIA [49]). Это допущение основано на том факте, что б*о*льшую часть бензина, реализуемого в США, составляет бензин марки E10 [51], который также используется в Германии (хотя и в меньшем масштабе). В имитационной модели принято, что используется только дизельное топливо, добываемое из ископаемых залежей φ_d = 2,67 $кг_{CO2}$/л (на основе данных EIA и ACEA).

На последнем этапе с помощью уравнения (1.6) определяются выбросы «от бака до колес» (TTW) $\varphi^{TTW}g$ для автомобиля BMW 340i выпуска 2016 г., имеющего расход топлива f_g = 7,7 л/100км [52]. Расчетное значение 179 $г_{CO2}$/км отлично согласуется со значением, указанным в технической спецификации на автомобиль (179 $г_{CO2}$/км) [52].

$$\Phi_g^{TTW}(2016\ \mathrm{BMW\ 340i}) = f_g \cdot \Phi_g = \frac{7.7\mathrm{l}}{100\ \mathrm{km}} \cdot \frac{2.33\ \mathrm{kg_{CO_2}}}{1\ \mathrm{l}} = 179\ \mathrm{g}\frac{\mathrm{co_2}}{\mathrm{km}} \qquad (1.6)$$

Если при определении выбросов «от скважины до колес» учесть выбросы «от скважины до бака», связанные с добычей нефти, ее переработкой и распределением бензина и дизельного топлива ($\varphi_{g/d}^{WTT}$ = 50 $г_{CO2}$/кВт/ч), выбросы углекислого газа увеличатся на 20 %, до 214 г $\frac{co_2}{km}$, см. уравнение (1.7).

$$\begin{aligned}\varphi_g^{WTT}(2016\ BMW\ 340i) &= f_g \cdot \left(\Phi_g^{WTT} + \Phi_{\frac{g}{d}}^{WTT} \cdot \epsilon_g^v\right) \\ &= \frac{7.7\ l}{100\ km} \cdot (2.33\ kg_{co_2} + 0.05 \frac{kg_{co_2}}{kWh} \cdot 9.10 \frac{kWh}{l} \\ &= 214 \frac{g_{co_2}}{km}\end{aligned} \tag{1.7}$$

Выбросы транспортного сектора с более чем 800 миллионами автомобилей на дорогах по всему миру [35, 53] составляют основную долю мировых выбросов парниковых газов. В 2012 г. 27 % (1 450 $Мт_{CO2}$) выбросов углекислого газа в США [54, 55] и 18 % (146 $Мт_{CO2}$) выбросов CO_2 в Германии [56, 57] были результатом эксплуатации автотранспорта. Эти данные не включают другие виды выбросов, например, оксидов азота и взвешенных частиц, которые также представляют опасность для здоровья и окружающей среды [58, 59].

1.2. Транспортные средства на основе аккумуляторных батарей (BEV)

Транспортные средства на основе аккумуляторных батарей (BEV) используют многократно заряжаемую аккумуляторную батарею для приведения в движение электродвигателя, который преобразует электроэнергию в механическое действие для сообщения автомобилю движения. И аккумуляторная батарея, и электродвигатель являются весьма эффективными системами. Это позволило BEV (Tesla Roadster® производства 2011 г.) уже более 10 лет назад достигнуть эффективности «от батарей к колесам» на уровне 88 % [1], что в три раза выше, чем эффективность «от бака к колесам» ТС ДВС и почти вдвое превышает это показатель у FCEV.

Таблица 4.4. Исходные параметры для BEV

BEV	Потребление электроэнергии при эксплуатации	Потребление электроэнергии при зарядке
	f_{BEV}(кВт/ч/100 км)	%
2015	24	85,0
2025	22	87,5
2035	20	90,0

Источники: примерная реалистичная оценка энергопотребления Tesla Model S AWD-90D® выпуска 2015 г. (на основе рейтинга EPA на уровне 21 кВт/ч/10 км) составляет 23 кВт/ч/100 км [60]. Эти данные используются в качестве консервативной оценки потребления энергии BEV, обеспечивающей достоверное сравнение этого показателя с данными для FCEV. Энергопотребление (рейтинг EPA) городских электромобилей, например, BMW i3®, гораздо ниже – 17 кВт/ч/100 км. Ожидается, что потребление электроэнергии при эксплуатации будет снижаться на 10 % каждые десять лет. Прогнозируется, что эффективность при зарядке будет повышаться каждое десятилетие на 2,5 %

В BEV текущего поколения наиболее часто устанавливаются литий-ионные батареи (ЛИБ). Как и в случае других видов аккумуляторных батарей, ЛИБ включают два электрода, погруженные в электролит, проводящий ионы. В случае ЛИБ электроды разделяет мембрана, проницаемая для ионов лития, поэтому весь внутренний ток переносится только ионами лития. В заряженной батарее литий перемежается с графитом или встроен в структуру из кремния, составляющую отрицательный электрод А. Во время разрядки атомы лития окисляются до ионов Li^+ на отрицательном электроде А (аноде[2]). После этого ионы перетекают сквозь электролит внутри батареи к положительному электроду В (катоду), выполненному из оксидов лития. Электроды на электроде А не могут пройти через электролит и мембрану батареи, поэтому к электроду В они перемещаются снаружи, питая при этом внешних потребителей (например, электродвигатель). На электроде В ионы Li^+ восстанавливаются

[2] «Электроны расходуются в реакции восстановления на одном электроде и создаются в реакции окисления на другом» (рис. 1.4). Электрод, на котором проходит реакция окисления, называется «анод». Электрод, на котором проходит реакция восстановления, называется «катод» [61].

поступающими электронами до разряженного состояния. После того как все ионы Li^+, ранее собранные у электрода A, достигнут электрода B, аккумуляторная батарея становится полностью разряженной.

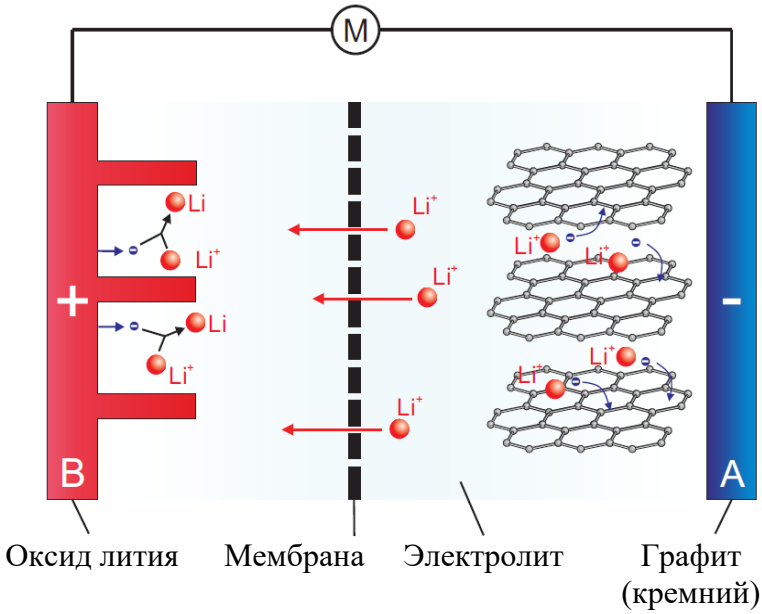


Рисунок 1.4. Литий-ионная батарея в процессе разрядки

Источники: Иллюстрация создана на основе [62–65]

Таблица 1.5. Состав материалов аккумуляторных батарей (положительного электрода) существующих моделей BEV

Транспортное средство	Мощность кВт/ч	Производитель	Технология производства	Положительный электрод	Производительность (на элемент батареи) (Вт/ч)
BMW i3® (2013 г.)	22	Samsung	NMC*	$LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$	130
BMW i3® (2017 г.)	33	Samsung	NMC	$LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$	200[3]
15 Leaf® (2011 г.)	24	AESC[4]	LMO/NMC	$LiMn_2O_4$	160
Leaf® (2016 г.)	30	AESC	NMC	$LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$	н/п
Model S® (2015 г.)	70 – 90	Panasonic	NCA	$LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.0}5O_2$	240

Источники: Для всех ТС: [66, 68–74]; Nissan Leaf® [75–77]; BMW i3®: [67, 78, 79]; Tesla Model S®: [69, 80, 81]. ∗ несколько, в основном NMC

[3] Масса элемента емкостью 94 Ач производства 2017 г. приведена к массе элемента емкостью 60 Ач производства 2013 г. – см. [67].

[4] Automotive Energy Supply Corporation®, совместное предприятие компаний Nissan®, NEC® и NEC/TOKIN®.

В случае, если на участке между положительным и отрицательным электродом приложен внешний потенциал, реакция в батарее обращается: Li окисляется до Li^+ на положительном электроде B из лития, который на время зарядки становится анодом[5]. Ионы Li^+ перетекают через электролит обратно к отрицательному электроду A (катоду), где они восстанавливаются до Li и опять соединяются с графитом или кремнием.

В современных ТС отрицательный электрод обычно выполнен из графита (C), кремния (Si) или из комбинации этих двух материалов. Согласно данным Курцвейла и Дитлмейера [66], электролиты включают соли лития (например, $LiPF_6$, $LiBF_4$) растворенные в смеси из этиленкарбоната ($(CH_2O)_2CO$), пропиленкарбоната ($CH_3C_2H_3O_2CO$) или диметилкарбоната ($OC(OCH_3)_2$). Положительные электроды выполняются из различных оксидов лития (таблица 1.5), оксида литий-никель-марганец-кобальта (NMC), оксида литий-марганец (LMO) или оксида литий-никель-кобальт-алюминия (NCA). Как было упомянуто в начале данного раздела, двумя основными проблемами BEV являются дальность пробега и время зарядки. Первая из проблем имеет скорее экономический, чем технический характер, – как было продемонстрировано компанией Tesla Motors, Inc.® еще несколько лет назад, BEV способны обеспечить дальность пробега в реальных условиях более чем 400 км на одной зарядке. Собственно, Илон Маск, Генеральный директор этой компании, заявил, что технология, позволяющая создать BEV с дальностью пробега до 1 500 км, будет доступна к 2027 г. [82]. При этом широкому распространению BEV с большой дальностью пробега препятствует их цена, достигающая 70 000–100 000 долл., причем основная доля этой цены приходится на стоимость аккумуляторной батареи. Учитывая ожидаемое снижение стоимости батарей в ближайшие годы [18, 83], стоит ожидать появления BEV с большой дальностью пробега в ценовом диапазоне, доступном широкому круг покупателей. Эту тенденцию уже отражают электромобили Chevrolet Bolt EV®

[5] В зависимости от направления процесса положительный электрод B может быть анодом (при зарядке) или катодом (во время разрядки). Следует отметить, что в теории аккумуляторных батарей принято положительный электрод B называть катодом, а отрицательный электрод A – анодом, принимая за основу процесс разрядки.

2017 г. выпуска и Tesla model 3® 2018 г. выпуска, имеющие дальность пробега более 300 км и цену менее 40 000 долл. [19, 20].

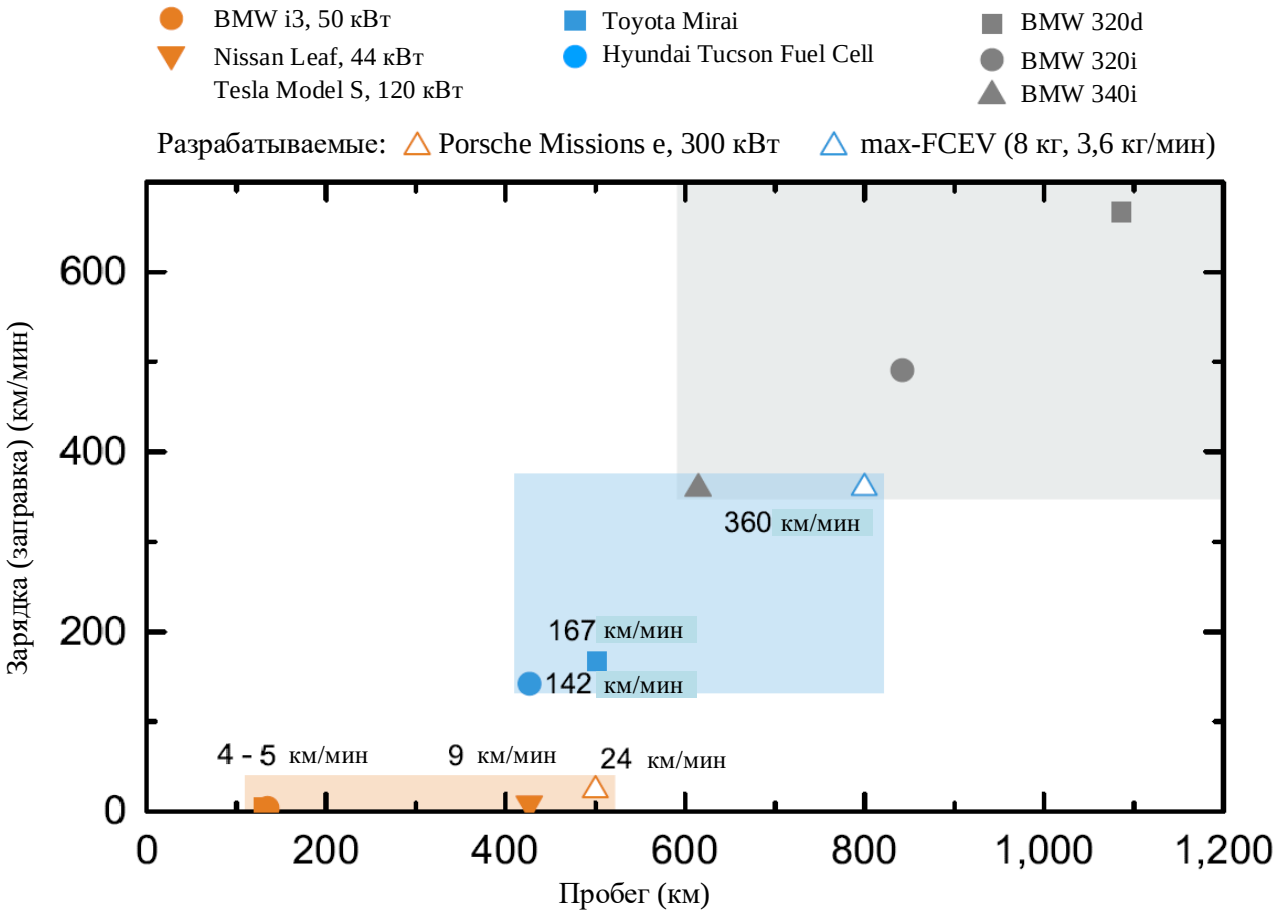


Рисунок 1.5. Дальность пробега и скорость заправки ТС ДВС (серым), BEV (оранжевым) и FCEV (синим). «max-FCEV» означает «идеальное FEV», имеющее производительность 8 кг/ч и скорость заправки на уровне стандарта SAE J2601

Источники: BMW i3®, Tesla Model S®, Nissan Leaf®, Toyota Mirai®, Hyundai Tucson Fuel Cell®: [60], Porsche Mission e® (начало производства было запланировано на 2020 г.): [25], BMW 3 series®: [52], длительность заправки FCEV водородом составляет 3 мин. Расчеты для ТС ДВС основаны на пропускной способности штуцера, равной 35 л/мин.

Однако скорее всего в обозримом будущем время зарядки BEV останется существенным недостатком этих ТС по сравнению с ТС ДВС и FCEV. При (расчетном) энергопотреблении на уровне 21 кВт/ч/100 км BEV заряжается на пробег 9,5 км за каждую минуту (на станции быстрой зарядки), тогда как ТС ДВС за одну минуту заправляются на расстояние, превышающее это значение

более чем на порядок величин (350–700 км/мин)[6]. Современные FCEV по этому показателю приближаются (140–170 км/мин) к ТС ДВС. Это различие проистекает из разного характера процессов зарядки (заправки). При заправке ТС ДВС и FCEV происходит физический перенос энергоносителя (бензина, дизельного топлива или водорода) в бак ТС, тогда как зарядка BEV – это химическая реакция, ограниченная постоянной скоростью ее протекания.

Повышение энергии зарядки до 300 кВт, предлагаемое компанией Porsche® [25], увеличит «скорость зарядки на пробег» до почти 25 км/мин, но при этом следует учитывать тот факт, что при расчетной эффективности зарядки в 90 % во время ее выполнения необходимо будет обеспечить отвод 30 кВт тепловой энергии.

Умная зарядка

Способность BEV использовать электроэнергию, вырабатываемую с использованием ветра и солнечного света, зависит от нескольких факторов. Прежде всего, BEV должны быть подключены к сети энергоснабжения в момент выработки энергии от ВИЭ. Например, для того, чтобы воспользоваться генерацией энергии от солнца, потребуется значительное количество зарядных станций, особенно на рабочих местах. Во-вторых, для того, чтобы добиться максимального использования BEV возобновляемой энергии, их владельцам придется отказаться от полной зарядки перед началом движения или соответственно изменить свои привычки. На сегодняшний день ввиду того, что емкость аккумуляторных батарей относительно невелика, BEV начинают зарядку немедленно после подключения, чтобы обеспечить максимальную дистанцию пробега за наименьшее время. В отличие от этого способа при «умной зарядке» или «ответственной зарядке» требуется контролировать процесс зарядки в зависимости от доступности энергии, вырабатываемой ВИЭ (или с учетом других ограничений, накладываемых сетью энергоснабжения). В случае, если автовладельцу нужно совершить

[6] При пропускной способности штуцера 35 л/мин и расходе топлива 5–10 л/100 км.

поездку внезапно, это может привести к меньшему уровню заряда батареи в момент отъезда, чем в первом случае с зарядкой немедленно после прибытия. Естественно, важность этого ограничения будет постепенно снижаться по мере увеличения средней емкости батарей транспортных средств в будущем.

Для того чтобы выполнить подробный анализ влияния «умной зарядки», необходимо было получить данные о подключении и отключении аккумуляторных батарей ТС, а также об уровне их заряда – для определения периодов времени, когда ТС подключены к сети энергоснабжения. Однако ввиду того, что надежные данные получить не представляется возможным, а также вследствие ограничения имитационной модели, «умная зарядка» в рамках модели не рассматривается. В результате этого имитационная модель не дает возможности смоделировать планирование электрической нагрузки в процессе зарядки BEV, так как она использует фиксированные профили зарядки. Соответственно, потенциальные возможности BEV по интеграции непостоянной генерации от ВИЭ путем плановой зарядки во время выработки больших объемов солнечной и ветровой энергии оценить не представляется возможным. Результаты моделирования не отражают снижения издержек и выбросов углекислого газа, которые можно достичь при «умной» зарядке BEV. Это ставит BEV в менее выгодное положение, чем FCEV.

1.3. Транспортные средства на основе топливных элементов (FCEV)

При том что FCEV и BEV используют разные виды энергии, их силовые агрегаты практически одинаковы[7] – их основой является электродвигатель, преобразующий электроэнергию в механическое действие для сообщения автомобилю движения. В качестве основного источника энергии FCEV используют не аккумуляторные батареи, а водород. Из числа разнообразных способов хранения водорода (см. подраздел 3.3) в настоящее время все более активно используется водород (сгH_2), сжатый под давлением 700 бар – в таких

[7] Они отличаются некоторыми вспомогательными компонентами, такими, как воздушный компрессор топливного элемента и система охлаждения.

моделях, как Toyota Mirai®, Hyundai ix35® и Honda Clarity®. Топливный элемент преобразует химическую энергию, заключающуюся в водороде, в электроэнергию, используемую для приведения электродвигателя в движение. Первый FCEV, GM® Electrovan выпущенный в 1966 г., использовал щелочной топливный элемент [85]. В современных ТС эта технология была замещена топливными элементами на основе протонообменных мембран (PEMFC). В большинстве FCEV топливный элемент PEMFC используется совместно с аккумуляторной батареей небольшой емкости, дополняющей ТЭ, например, во время ускорения, а также обеспечивающей рекуперацию кинетической энергии.

Таблица 4.6. Исходные параметры для FCEV

FCEV	Потребление водорода f_{FCEV}(кг/100 км)	f_{FCEV}(кВт/ч$_{НТС}$/100 км)
2015	1,2	40,0
2025	1,1	36,7
2036	1,0	33,3

Источники: данные о потреблении за 2015 г. – это оптимистичные (реалистичные) оценки, основанные на опросе экспертов из автопромышленной отрасли и рейтингах EPA, значения которых составляют 1,3 кг/100 км для Hyundai Tucson Fuel Cell® (2016 г. в.) и 1,0 кг/100 км для Toyota Mirai® (2016 г. в.) [60, 84]. Прогнозы на будущее основаны на опросах экспертов. Они отражают снижение на 0,1 кг/100 км за каждые десять лет

Как было указано выше, FCEV имеют явное преимущество перед BEV в части скорости заправки, так как физическое перемещение водорода происходит гораздо быстрее, чем химические реакции, связанные с зарядкой аккумуляторных батарей (см. рис. 1.5). Еще одним преимуществом заправки перед зарядкой является то, что водород можно вырабатывать в периоды генерации электроэнергии от ВИЭ, а затем хранить в емкостях для последующей заправки FCEV, тогда как BEV необходимо физически подключать к сети энергоснабжения во время генерации энергии от ВИЭ. Такая

высокая степень гибкости, связанная с выработкой водорода, предоставляет отличные возможности для изменения объемов выработки водорода при изменении объемов генерации электроэнергии.

В то же время FCEV имеют по сравнению с BEV явный недостаток в отношении энергоэффективности. Эффективность[8] выработки водорода самым современным электролизером (см. п. 2.3.1) составляет 52–64 %$_{НТС}$ [6], 36–48 % потребляемой электроэнергии теряется в виде тепловых потерь. Опрос экспертов позволил оценить эффективность топливных элементов современных FCEV на уровне около 45–50 %$_{НТС}$, а это значит, что эффективность преобразования энергии составляет от 23 до 32 % – и это без учета потребления энергии, связанного со сжатием водорода для заправки FCEV. Можно сделать вывод, что хранение водорода требует в три-четыре раза больше энергии, чем при использовании литий-ионных аккумуляторов с эффективностью 80–95 % [86–88]. Даже с учетом существенного увеличения эффективности технологий, используемых в цепочке выработки водорода, скорее всего к 2035 г. FCEV останутся в 2,5 раза более энергоемкими, чем BEV (см. рис. 1.6).

Кроме того, недостаточное количество станций заправки водорода продолжает представлять собой значительную проблему с учетом необходимости существенных вложений в сеть таких станций задолго до момента, когда количество FCEV на дорогах позволит этим станциям получать прибыль. Несмотря на то что инфраструктура для BEV имеет такую же проблему, связанную с прибылью, внедрение BEV не настолько затруднено, т. к. электроэнергия доступна почти в любом месте. Масштаб проблемы, связанной с инфраструктурой ЭТС, делает ее достойной отдельного исследования и не входит в объем настоящей работы. По этой причине мы лишь кратко коснемся расходов, связанных с развитием инфраструктуры, в следующем разделе.

[8] После установки. Вследствие постепенного снижения рабочих характеристик эффективность ежегодно падает примерно на 0,25–2,5 % [6].

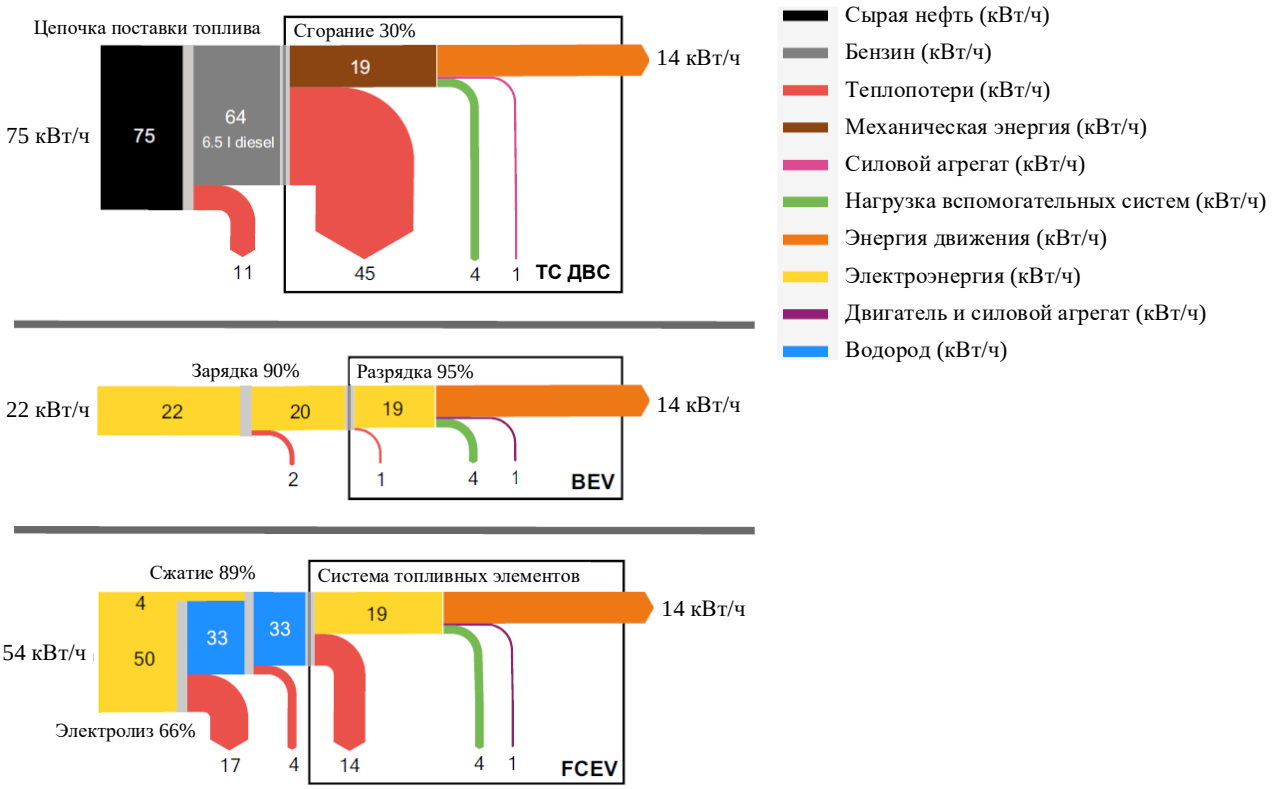


Рисунок 1.6. Диаграмма Сэнки потребления энергии «от скважины до колес» ТС ДВС по сравнению с ЭТС, питаемыми электроэнергией из возобновляемых источников. Иллюстрация основана на данных об эффективности за 2005 г.; энергия движения для всех видов ТС принята одинаковой

Источники: потери при зарядке: [89], эффективность аккумуляторных батарей: [86–88], расчет нагрузок вспомогательных систем: [90, 91], расчет потерь в силовом агрегате [86]

1.4. Оценка затрат на зарядные станции BEV и пункты заправки FCEV водородом

Широкая доступность электроэнергии является явным преимуществом при внедрении BEV по сравнению с FCEV. Кроме того, вложения для постройки одной зарядной станции (2 000–30 000 долл., в зависимости от выходной мощности) немного ниже, чем в случае станции заправки водородом (1–2 миллиона долл.). Однако ранее упоминавшийся основной недостаток BEV – долгое время зарядки – также оказывает негативное влияние на количество зарядных станций, необходимых для широкого распространения BEV. Ввиду того, что времени для зарядки BEV для обеспечения дальности

пробега, равной таковой у FCEV, необходимо на порядок величин больше (рис. 1.5), каждая зарядная станция будет использоваться более длительно, чем пункт заправки водородом. Соответственно, потребуется большее количество точек зарядки, чем пунктов заправки водородом.

Таблица 1.7. Исходные параметры для расчета стоимости затрат на зарядные станции и пункты заправки водородом

	Настенный разъем для подключения BEV	Устройство быстрой зарядки BEV ≥ 50 кВт	Пункт заправки водородом	Срок эксплуатации L(а)
2015	2000	25 000	1000	15
2025	1500	18 800	500	
2035	1000	12 500	500	

Источники: расчет стоимости розеток и зарядных устройств на 2015 г. основан на [92–94], прогнозы на 2025 и 2035 гг. основаны на результатах большого количества опросов экспертов из автомобильной промышленности. Расчет стоимости станции заправки водородом основан на [95] и опросах двух экспертов, представляющих автомобильную промышленность

Это обстоятельство можно проиллюстрировать путем сравнения с существующей инфраструктурой заправки ТС ДВС. Если принять, что на 14 500 заправочных станциях Германии (DE) [96] по 6 раздаточных колонок, одна такая колонка приходится на 520 ТС ДВС[9]. Существующие планы развития зарядной инфраструктуры в DE предполагают постройку около 180 000 зарядных станций общественного пользования, которые будут обслуживать 1–2 миллиона BEV [93], то есть по 10 BEV на одну станцию. Этот вопрос был рассмотрен в работе, опубликованной в 2010 г. консалтинговой компанией McKinsey & Co. совместно с различными автопроизводителями [99]. В работе делается следующий вывод: «вследствие модульного характера электрическую инфраструктуру проще развернуть, однако после 2020 г. расходы на развертывание инфраструктуры FCEV станут меньше таких расходов для BEV с учетом того, что количество зарядных станций

[9] За исключением грузовых автомобилей. В Германии насчитывается около 45 миллионов пассажирских транспортных средств [97]. В Калифорнии (CA) имеется около 10 000 заправочных станций и 26 миллионов ТС ДВС [98], то есть на один пункт заправки приходится около 430 ТС ДВС.

общественного пользования будет оставаться соизмеримым с количеством ТС ввиду длительного времени зарядки. С другой стороны, после охвата некоторой территории инфраструктурой заправки водородом независимо от количества ТС дальнейшие инвестиции не потребуются ввиду короткого времени заправки».

Несмотря на тот факт, что количество зарядных станций будет зависеть от возможности выполнять зарядку дома[10] и от емкости аккумуляторной батареи, эксперты [99, 100] склоняются к тому, что инфраструктура зарядки BEV будет более дорогостоящей, чем развертывание пунктов заправки водородом. Настоящее исследование включает расчет необходимой инфраструктуры зарядки (заправки) с учетом этого экономического эффекта для FCEV.

Для целей данной оценки расходов в отношении инфраструктуры зарядки BEV было сделано два допущения: 50 % BEV заряжаются дома, от розеток. Для зарядки других 50 % BEV либо используются существующие зарядные системы для зарядки дома, либо их зарядка осуществляется в других местах. Добавлено по одной станции быстрой зарядки общего пользования на каждые 30 BEV парка ТС. В отношении инфраструктуры заправки FCEV опрос экспертов в этой области[11] позволил определить, что самая большая часть расходов, связанных со станциями заправки водородом, относится на счет сжатия и хранения этого газа, которые уже учтены в имитационной модели. Остальные пункты заправки водородом включены с учетом производительности (стоимость на производительность заправки на сутки, см. таблицу 1.7). Для примера, вложения в строительство пунктов заправки водородом, способных отдать 1 000 кг/сутки, составят 500 000 долл. (на 2025 г.) и 350 000 долл. (на 2035 г.) соответственно.

[10] Недавно проведенное исследование показало, что 81–84 % событий зарядки происходят дома [33, 34].
[11] Среди прочих – Маркуса Фрайтага и Маркуса Кампича, представляющих группу компаний BMW.

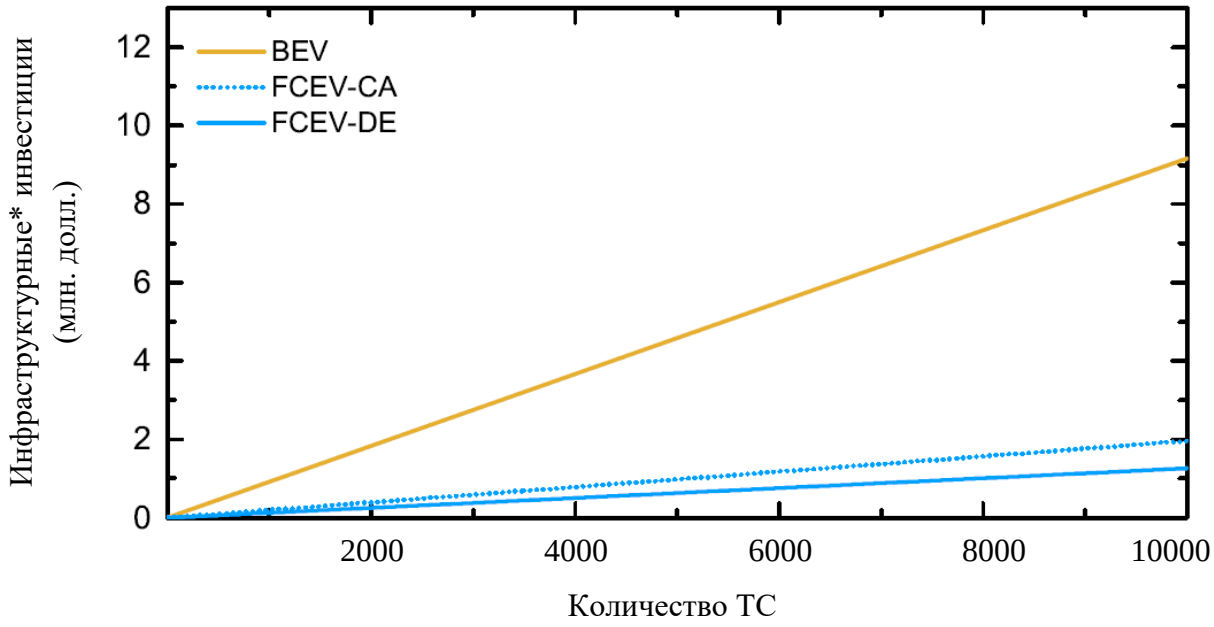


Рисунок 1.7. Расчетные капиталовложения в инфраструктуру зарядки BEV (заправки FCEV) в 2035 г. (∗) Инфраструктура заправки водородом включает только пункты заправки водородом, включенные в АТС (подраздел 2.1.2). Электролизеры, компрессоры и системы хранения в расчет не включены, так как объемы их установки и соответствующие вложения определены с помощью имитационной модели VICUS (см. подраздел 2.1.1)

С учетом изложенных допущений инфраструктура зарядки в 5 (CA) и 7 (DE) раз более дорогостоящая, чем инфраструктура *заправки* водородом (рис. 1.7). Большие расстояния, проезжаемые ТС в CA, ведут к повышенному потреблению водорода по сравнению с DE и, соответственно, к потребности в дополнительных мощностях заправки водородом. В отношении BEV сделано допущение, что дополнительную электроэнергию для зарядки они будут в основном получать дома (в настоящее время доля зарядки дома составляет более 81 % [33, 34]), что исключит необходимость в дополнительных зарядных станциях.

1.5. Отступление. Выбросы за срок службы и доступность важного сырья

Имитационная модель определяет выбросы углекислого газа транспорта по принципу «от скважины до колес» (WTW), что включает в себя две составляющие: (1) выбросы «от скважины до бака» (WTT) – выбросы

в процессе предоставления энергоносителя (электроэнергии), т. е. при добыче нефти, ее переработке и доставке топлива (генерация электроэнергии, выработка водорода); (2) выбросы «от бака до колес» (TTW), возникающие при преобразовании кинетической энергии, осуществляемом ТС. В вычислениях не учтена третья составляющая, относящаяся к производству и утилизации транспортных средств. Она более подробно рассматривается в п. 1.5.1 на основе недавнего исследования жизненного цикла, выполненного Ноттер и др. [2].

Обобщая, отметим, что по сравнению с ТС ДВС и производство, и утилизация BEV и FCEV сопряжены со значительным (2–4 тонны) количеством выбросов углекислого газа. Однако это небольшое количество, если сравнить его с выбросами углекислого газа WTW, исключаемыми при использовании этих ТС на этапе эксплуатации за весь срок службы (рис. 1.9). Однако предварительным условием для такого снижения является генерация электроэнергии способами с меньшей интенсивностью выбросов углекислоты (особенно в Германии).

Доступность сырья (которая не является темой настоящего исследования) имеет чрезвычайную важность для массового производства (доступных) электрических транспортных средств. Этот вопрос будет кратко рассмотрен в пункте 1.5.2, посвященном литий-ионным батареям, топливным элементам и электродвигателям.

Доступные объемы лития, кобальта, никеля, марганца, платины и редкоземельных элементов (РЗЭ) достаточны для того, чтобы полностью заменить весь парк транспортных средств, существующий на 2015 г., транспортными средствами на аккумуляторных батареях и топливных элементах. При этом темпы добычи в кратко- и среднесрочной перспективе могут стать (временным) сдерживающим фактором в отношении некоторых из этих материалов. Кроме того, существует некоторая неопределенность в отношении возможности всех стран получить доступ к этим ресурсам, так как запасы некоторых из них (в частности, лития, платины, РЗЭ) сосредоточены в очень небольшом числе государств.

1.5.1. Анализ жизненного цикла

Выбросы углекислого газа Φ^{tot} за весь жизненный цикл транспортного средства можно разделить на постоянные и переменные выбросы.

$$\Phi^{tot} = \Phi^{WTW} + \Phi^{fix} \tag{1.8}$$

Первый член уравнения (1.8), переменные выбросы, или выбросы «от скважины до колес» (WTW) Φ^{WTW} ($кг_{CO2}$), зависит от дальности пробега за жизненный цикл S (км), удельное потребление энергии λ (кВт/ч/км) транспортного средства, а также двух подтермов: выбросы «от скважины до бака» (WTT) φ^{WTT} ($кг_{CO2}$/кВт/ч) для предоставления соответствующего энергоносителя (например, добыча и переработка нефти, доставка электричества или топлива BEV или FCEV соответственно) и выбросы «от бака к колесам» (TTW) φ^{TTW} ($кг_{CO2}$/кВт/ч) от преобразования в кинетическую энергию, совершаемого транспортным средством.

$$\Phi^{WTW} = S \cdot \lambda \cdot (\Phi^{WTT} + \Phi^{TTW}) \tag{1.9}$$

Второй член уравнения (1.8), Φ^{fix} ($кг_{CO2}$), служит для количественного определения выбросов, произведенных при производстве, техническом обслуживании и утилизации транспортного средства, и не зависит от пройденного ТС расстояния S:

$$\Phi^{fix} = \Phi^{glider} + \Phi^{drivetrain} + \Phi^{motor} + \Phi^{battery/fuel\,cell} + \Phi^{M\&D} \tag{1.10}$$

Согласно исследованию Ноттер и др. [2], они отличаются для указанных видов ТС (ТС ДВС, BEV и FCEV) в основном вследствие дополнительных компонентов ЭТС (аккумуляторные батареи, топливные элементы). Сравнение результирующей экологической нагрузки электрических транспортных средств $\Delta^{fix} = \Phi^{fix}$ (EV) $- \Phi^{fix}$ (ICV) $= \Phi^{battery/fuel\ cell}$ с ТС ДВС показано на рисунке 1.8.

В этом упрощенном представлении вид ТС, оказывающий большую экологическую нагрузку на км = 0 (BEV или FCEV), зависит от емкости аккумуляторных батарей. Тогда как BEV с батареей емкостью 35 кВт/ч, имеет более низкие начальные выбросы Φ^{fix} по сравнению с FCEV, в том случае, если емкость батареи равна 80 кВт/ч, справедливо будет уже обратное. В любом случае фиксированные выбросы любого из этих видов ТС выше, чем у ТС ДВС. В дальнейших расчетах за основу принимается BEV с емкостью 80 кВт/ч в качестве консервативной оценки для BEV.

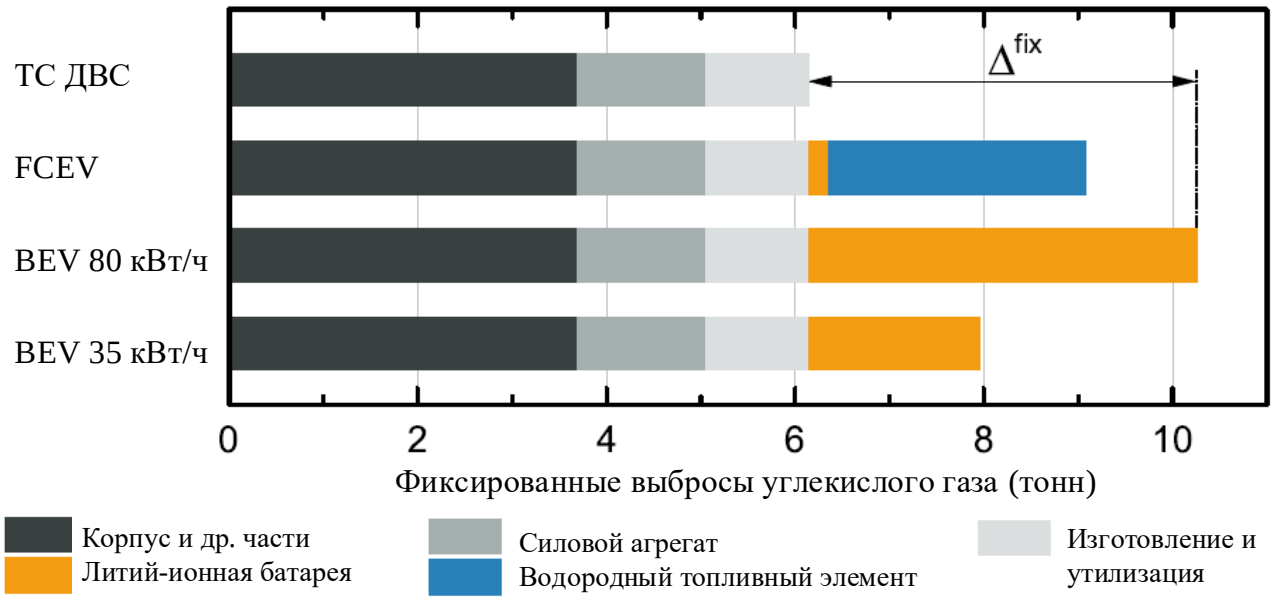


Рисунок 1.8. Выбросы углекислого газа, связанные с производством, техническим обслуживанием и утилизацией ТС разных видов

Источники: данные о корпусе (шасси), силовом агрегате, транспортном обслуживании и утилизации, литий-ионных батареях и водородных топливных элементах основаны на [2]

Соответственно, снижение объема выбросов углекислого газа R_{EV} ЭТС по сравнению с ТС ДВС определяется их возможностью по снижению объема переменных выбросов при пользовании ТС:

$$\begin{aligned} R_{EV} &= \Phi^{tot}(ICV) - \Phi^{tot}(EV) \\ &= \Phi^{fix}(ICV) + \Phi^{WTW}(ICV) - \left[\Phi^{fix}(EV) + \Phi^{WTW}(EV)\right] \\ &= \Phi^{WTW}(ICV) - \Phi^{WTW}(EV) - \Delta_{fix} \end{aligned} \quad (1.11)$$

Выбросы WTW для ТС ДВС, работающего на дизельном топливе, с потреблением топлива f_d = 6 л/100 км и соответствующим значением [12] λ_{ICV} = = $f_d \cdot \epsilon_d$ = 0,59 кВт/ч/км можно рассчитать с помощью уравнения (1.12). Выбросы WTT при добыче, переработке нефти и доставке топлива на заправочные станции равны приблизительно $\Phi_d^{WTT}\varphi$ = 50 $г_{CO2}$/кВт/$ч_{diesel}$ [4, 5]; выбросы TTW при идеальном процессе сжигания бензина[13] составляют $\Phi_d^{WTT} = \Phi_d/\epsilon_d^v$= 271 г/кВт/ч. Эти значения использованы для расчета выбросов WTW Φ^{WTW} (для ТС ДВС) на уровне около 190 $г_{CO2}$/км:

$$\begin{aligned}\Phi^{WTW}(ICV) &= S \cdot \epsilon_d^v \cdot \left(\Phi_d^{WTT} + \Phi_d^{TTW}\right)\\ &= S \cdot 6\ l/100km \cdot 9.87\ kWh/l \cdot (50 g_{CO_2}/kWh + 271\ g_{CO_2}/kWh)\\ &\approx S \cdot 190\ g_{CO_2}/km\end{aligned} \qquad (1.12)$$

Вследствие особенностей силового агрегата ЭТС не выделяют углекислого газа при эксплуатации (Φ^{TTW} (ЭТС) = 0 г/км). Это значит, что переменная интенсивность выбросов углекислого газа (1.13) полностью определяется выбросами WTT (интенсивность выбросов углекислого газа при генерации электричества составляет φ_{grid} ($\Phi^{WTT} = \varphi_{grid}$), а удельное потребление энергии – λ на 1 км.

$$\begin{aligned}\Phi^{WTW}(EV) &= S \cdot \lambda_{EV}\left(\Phi_{grid}(EV) + \underbrace{\Phi^{TTW}(EV)}_{0}\right)\\ &= S \cdot \lambda_{EV} \cdot \Phi_{grid}(EV)\end{aligned} \qquad (1.13)$$

Исходя из допущения, что на 100 км пробега BEV и FCEV требуется 20 кВт/ч электроэнергии, можно рассчитать удельное потребление энергии λ_{EV} с помощью следующего уравнения:

[12] Удельная энергия дизельного топлива на единицу объема: ϵ_d^v = 9,87 кВт/ч/л, см. таблицу 1.3.

[13] $\Phi_d^{TTW} = \Phi_d/\epsilon_d^v$. Имея количество углекислого газа, выбрасываемого на 1 литр дизельного топлива, равным Φ_d= 2,67 $кг_{CO2}$/л и удельную энергию топлива на единицу объема равной ϵ_d^v = 9,87 кВт/ч/л – см. таблицу 1.3 и (1.6).

$$\lambda_{BEV} = \frac{0{,}2\ \text{кВт/ч}_{\text{эл}}/\text{км}}{\eta_{\text{зарядк}} \cdot \eta_{\text{разрядк}}} = \frac{0{,}2\ \text{кВт/ч}_{\text{эл}}/\text{км}}{0{,}9} \approx 0{,}22 \frac{\text{кВт/ч}_{\text{эл}}}{\text{км}}$$

$$\lambda_{FCEV} = \frac{0{,}2\ \text{кВт/ч}_{\text{эл}}}{\eta_{\text{электролизер}} \cdot \eta_{\text{сжатие}} \cdot \eta_{\text{топ. яч}}} = \frac{0{,}2\ \text{кВт/ч}_{\text{эл}}/\text{км}}{0{,}6 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}6} \approx 0{,}58 \frac{\text{кВт/ч}_{\text{эл}}}{\text{км}} \qquad (1.14)$$

Используя значение экологической нагрузки Δ^{fix} из рисунка 1.8, можно сформулировать линейное уравнение для определения снижения выбросов углекислого газа R_{EV} путем подстановки уравнений (1.12) и (1.14) в уравнение (1.11). На основании результатов вычислений можно сделать вывод о том, что общее снижение выбросов углекислого газа R увеличивается с уменьшением интенсивности образования выбросов углекислого газа при генерации электроэнергии φ_{grid}:

$$R(\text{BEV80kWh}) = S \cdot \left(190 \frac{\text{г}}{\text{кВт/ч}_{\text{эл}}} - 0{,}22 \frac{\text{кВт/ч}_{\text{эл}}}{\text{км}} \cdot \Phi_{\text{grid}}\right) - 4100\ \text{кг}$$

$$R(\text{FCEV}) = S \cdot \left(190 \frac{\text{г}}{\text{кВт/ч}_{\text{эл}}} - 0{,}58 \frac{\text{кВт/ч}_{\text{эл}}}{\text{км}} \cdot \Phi_{\text{grid}}\right) - 2900\ \text{кг} \qquad (1.15)$$

Это отношение проиллюстрировано на рисунке 1.9 для различных значений φ_{grid} от 0,250 до 500 г/кВт/$ч_{el}$. Расчеты показывают, что декарбонизация транспортного сектора напрямую зависит от успешности «энергетического перехода» в энергетическом секторе. Этот эффект более явно выражен для FCEV, чем для BEV, за счет более высокого потребления энергии FCEV на километр пути (1.14).

Можно также отметить, что этап производства и утилизации ЭТС играет все меньшую роль по мере снижения интенсивности выбросов углекислого газа в сетях энергоснабжения. Для того чтобы обеспечить максимальное возможное снижение выбросов углекислого газа на уровне 20 тонн в Германии и до 35 тонн в Калифорнии за 12-летний период[14], выработка энергии должна стать

[14] Среднее транспортное средство проезжает около 13 000 км и 20 600 км в год в DE и CA, соответственно. Учитывая срок службы ТС, составляющий в среднем 12 лет, за этот период времени ТС проезжает приблизительно 150 000 км (DE) и 250 000 км (CA).

намного менее углеродоемкой, чем сегодня (для Германии ≈ 540 г/кВт/ч$_{el}$, для Калифорнии ≈ 310 г/кВт$_{el}$).

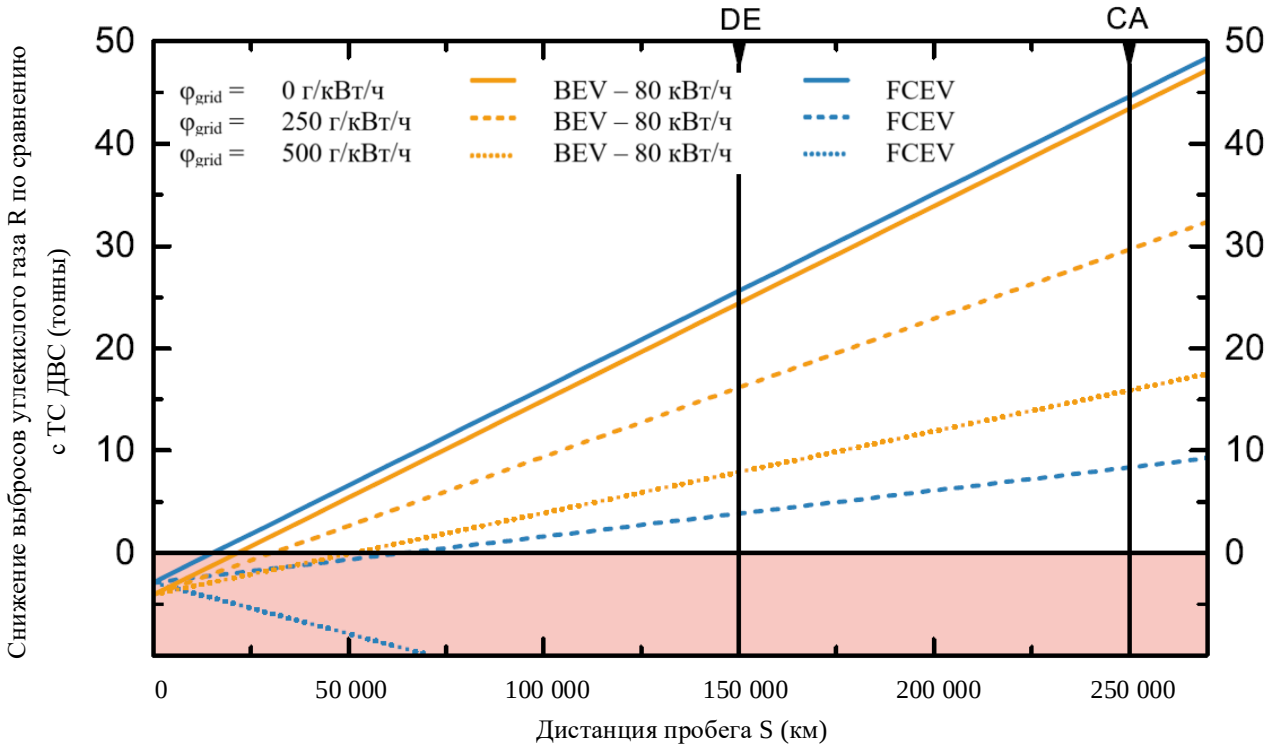


Рисунок 1.9. Снижение выбросов углекислого газа для сетевого электричества, обеспечиваемое BEV мощностью 80 кВт/ч и FCEV по сравнению с ТС ДВС с потреблением топлива 6 л дизельного топлива на 100 км для различной интенсивности выбросов углекислого газа φ_{grid} сетей энергоснабжения

1.5.2. Доступность материалов

Переход к электрическим средствам обеспечения мобильности приведет к существенному изменению в структуре потребностей сырья для автомобильной промышленности. Далее изложен краткий обзор доступности материалов (лития, кобальта, марганца, никеля для литиевых аккумуляторных батарей (BEV[15]), платины – для топливных элементов (FCEV) и редкоземельных элементов (РЗЭ) для электродвигателей (BEV, FCEV).

[15] В конструкцию FCEV входят относительно небольшие аккумуляторные батареи, обеспечивающие энергию на максимальной нагрузке (например, при ускорении и движении на высокой скорости) в дополнение к топливным элементам.

Литиевые аккумуляторные батареи

Было проведено большое число исследований вопроса достаточности объемов сырья для изготовления батарей для BEV в кратко- и долгосрочной перспективе [101–105]. Для существующей сегодня технологии производства особый интерес представляют литий, кобальт, никель и марганец (Li, Co, Ni, Mn), необходимые для изготовления положительного электрода. Далее представлен анализ существующих технологий и технологий ближней перспективы (техпроцессы NMC622 и NMC811, требующие больших количеств никеля)[16], позволяющий оценить вероятность появления «аккумуляторной батареи пиковой мощности»[17] согласно термину Бутчер [103].

Для оценки, изложенной далее, были приняты два важных допущения о потребности в материалах и доступном их предложении:

1. Потребность в материалах рассчитана для BEV с аккумуляторной батареей емкостью 80 кВт/ч (дальность пробега в реальных условиях – 400 км, потребление энергии – 20 кВт/ч/100 км) – это консервативная оценка.

2. Принято, что для производства аккумуляторных батарей для ЭТС доступна треть общемирового объема производства. Для сравнения: сегодня для производства батарей уже используется более трети производимого объема лития [107–109] и кобальта [110, 111] а также 3–5 %[18] никеля [112, 114].

Потребности в материалах для производства ячейки аккумуляторной батареи емкости 80 кВт/ч указаны в таблице 1.8. Масса батарей, производимых по существующим технологиям (NMC111, NCA и LMO), составляет m_{cell} = 320 – 500 кг[19], и в основном зависит от энергоемкости (таблица 1.5), обеспечиваемой соответствующей технологией. С учетом консервативного допущения, что масса положительного электрода составляет около 30 % от

[16] $LiNi_{0.6}Mn_{0.2}Co_{0.2}O_2$, ≈ 235Вт/ч/кг$_{cell}$ и $LiNi_{0.8}Mn_{0.1}Co_{0.1}O_2$ [106] ≈ 255Вт/ч/кг$_{gcell}$. Значения энергоемкости были рассчитаны на основе [73, 74] и предположения, что доля массы элемента батареи останется на уровне технологии NMC111.

[17] Уменьшение объемов производства и (или) истощение источников важного сырья, необходимого для производства аккумуляторных батарей.

[18] Более двух третей используется для производства нержавеющей стали [112, 113].

[19] Для сравнения: масса целой аккумуляторной батареи, выполненной по технологии NCA и имеющей емкость 85 кВт/ч, которая используется в электромобиле Tesla model S, составляет около 544 кг [115].

массы ячейки (20–30 % [116, 117]), его расчетная масса m_{PE} составляет около 94–150 кг (таблица 1.8).

Таблица 1.8. Состав материалов положительного электрода и соответствующие потребности в материалах на 1 ячейку емкостью 80 кВт/ч

		Li	Ni	Mn	Co	Al	O	
Атомная масса	(u)	6,94	58,69	54,94	58,93	26,98	16,00	
Материал положительного электрода		Li	Ni	Mn	Co	Al	O	
SoA-NMC111	% (масс)	7	20	19	20		33	
SoA - NCA	% (масс)	7	49		9	1	33	
SoA - LMO	% (масс)	4		61			35	
Nt - NMC622	% (масс)	7	36	11	12		33	
Nt - NMC811	% (масс)	7	48	6	6		33	
Вес положительного электрода m_{PE}		Li	Ni	Mn	Co	Al	O	∑
SoA - NMC111	кг	9	24	23	24		40	120
SoA - NCA	кг	7	47		9	1	32	96
SoA - LMO	кг	6		91			53	150
Nt - NMC622	кг	7	37	12	12		34	102
Nt - NMC811	кг	7	46	5	6		31	94

Источники: атомные массы элементов [120]; энергоемкость ячейки и материала катода [66, 73, 74, 121], см. таблицу 1.5

Кислород, алюминий и углерод составляют, соответственно, 46, 8 и 0,06 % состава земной коры [118, 119]. По этой причине эти материалы считаются имеющимися в избытке и в рамках настоящего анализа далее рассматриваться не будут.

С точки зрения предложения в качестве показателей кратко- и долгосрочной доступности сырья использованы годовое производство (краткосрочное) и разведанные мировые запасы[20] (долгосрочные). На рисунке 1.10 показаны BEV, которые могут быть произведены с учетом этих показателей. Данные показывают, что все эти четыре металла доступны

[20] «Концентрация твердых, жидких и газообразных материалов природного происхождения в земной коре в таком виде и количествах, которые позволяют (в настоящем или будущем) осуществлять коммерческое извлечение товара» [109].

в количествах, достаточных для того, чтобы заменить весь парк пассажирских транспортных средств, существующий на 2015 г. (830 миллионов ТС [35]) на BEV. Эти результаты примерно соответствуют результатам, опубликованным Вадиа и др. [122], в которых делается вывод, что «с учетом текущих прогнозов о запасах лития может быть изготовлено порядка 1 миллиарда литиевых аккумуляторных батарей для ЭТС емкостью 400 кВт/ч».

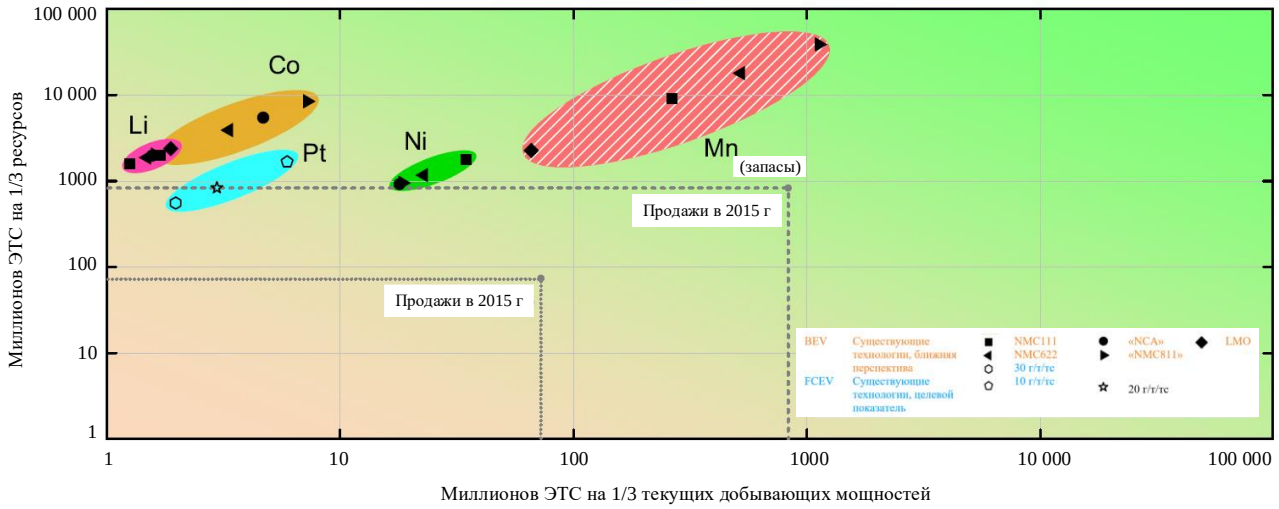


Рисунок 1.10. Количество BEV (с емкостью батареи 80 кВт/ч) и FCEV, которые могут быть изготовлены с учетом текущих темпов добычи и известных запасов лития, никеля, кобальта, марганца и платины. Тогда как общие запасы (ось x) не представляют существенной проблемы, стоит вопрос о том, не станут ли объемы производства ограничивающим фактором, если добыча материалов не будет увеличена по сравнению с текущим уровнем (ось y)? При текущих объемах добычи можно изготовить всего несколько миллионов BEV по технологии SoA и Nt

Источники: Иллюстрация создана на основе [101]. В 2015 г. годовой объем продаж автомобилей должен достичь 72,4 млн единиц [123], а общее количество пассажирских автомобилей на планете – 830 миллионов [35]

Запасы Ni и Li наименьшие, тогда как запасы Mn практически не представляют проблем, особенно с учетом того, что для целей оценки были приняты текущие запасы (620 млн т), а не мировые запасы ввиду отсутствия точных данных[21].

[21] В Геологическом обследовании за 2016 г. Геологической службы США мировые запасы оцениваются как «значительные» [109]. Кроме того, на дне большинства океанов были выявлены конкреции марганца [124].

Однако в краткосрочной перспективе обеспечение снабжения может стать проблематичным в случае расширения объемов производства BEV с сохранением темпов добычи Li, Co и Ni на прежнем уровне. Опять-таки запасы Mn представляют собой наименьшую проблему, даже в том случае, если все транспортные средства, производимые сегодня, являлись бы BEV. Предложение Ni также не должно представлять проблемы, за исключением того гипотетического случая, если бы производилось 20–30 миллионов BEV в год при текущем уровне добычи этого металла. Текущие темпы добычи Li и Co, напротив, позволяют выпускать только пару миллионов BEV с большой дистанцией пробега. Важность кобальта будет снижаться при выпуске в будущем BEV, оснащенных аккумуляторными батареями, изготовленными по техпроцессам NMC622 и NMC811 с использованием в основном никеля, а также, в более отдаленной перспективе – литиево-серных (Li_2S) и литиево-кислородных (Li_2O_2) батарей[22].

При этом объемы производства лития нужно будет нарастить – в случае, если литиевые аккумуляторные батареи останутся основой выпуска BEV. Текущие ограничения добычи лития не должны удивлять: в 2000 г. этот метал использовался в основном для изготовления керамики, смазочных материалов, химикатов и фармацевтических препаратов, а производство аккумуляторных батарей составляло менее десяти процентов спроса (рис. 1.11) [127]. Сегодня производство аккумуляторных батарей имеет самую большую долю (≈ 1/3) потребления, ожидается, что к 2025 г. она вырастет до 65 % [128]. Увеличение спроса вызвало рост рыночных цен на этот материал (см. рис. 1.11).

Представленные выше расчеты основаны на текущих объемах производства, это приблизительная оценка количества аккумуляторных батарей, которое можно изготовить с учетом текущих объемов производства лития. Расчет не учитывает загрузку мощностей существующих добывающих производств и, соответственно, не принимает во внимание возможные избыточные объемы производства. В течение периода с 2012 по 2014 г. была

[22] Источники информации о Li_2S и Li_2O_2 батареях: [66, 68] и [125, 126] соответственно.

приостановлена работа нескольких добывающих заводов по причине недостаточного спроса на литий [129]. Таким образом, в случае, если повышенный спрос на BEV приведет к сокращению запасов лития, более высокие цены могут стать причиной возобновления добычи на бездействующих мощностях.

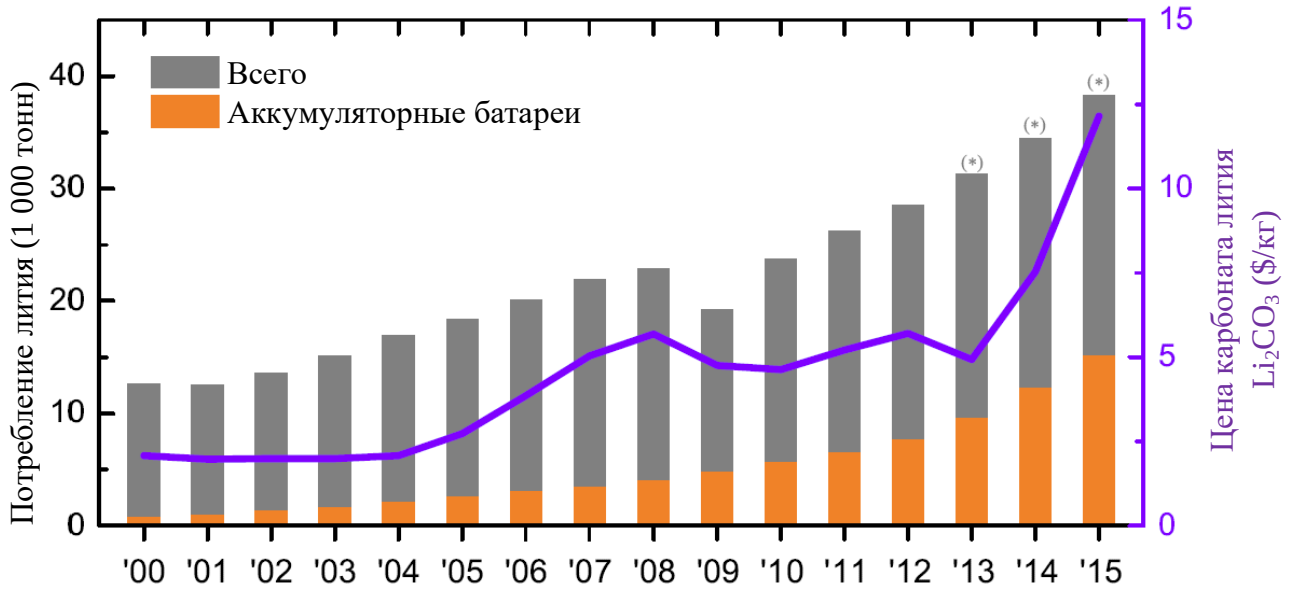


Рисунок 1.11. Доля аккумуляторных батарей в общем потреблении лития, изменение цен на карбонат лития Li_2CO_3 с 2000 г. Значения спроса, помеченные звездочкой, рассчитаны на основе [127]

Источник: цены на карбонат лития: цены за предыдущие периоды (2000–2012 гг.) [128] и спотовые цены за период 2008–2015 гг. на Li_2CO_3 99 % очистки [131], Citigroup. Потребление [127]

Что касается краткосрочной доступности лития, Форстер [104] в своем исследовании считает, что «согласно наиболее правдоподобному сценарию можно ожидать перепроизводства лития (в течение текущего десятилетия предложение вырастет втрое) в течение следующих 7–8 лет, что приведет к снижению цен. Поэтому заявления о будущей нехватке лития преувеличены». В еще одном кратком исследовании, проведенном Бутчер в 2012 г. [103], сделаны схожие выводы: «Если компания Tesla или любая другая вознамерится изготавливать 10 миллионов ЭТС с большой дальностью пробега в год

в течение восьмилетнего периода [до 2020 г.], она не столкнется ни с нехваткой сырья, ни с недостаточной производственной способностью рынка». Аналогичные перспективы в 2015 г. изложила Голди-Скот в [130]: «наше [«Блумберг Нью Энерджи Финанс»] мнение заключается в том, что в кратко- и среднесрочной перспективе нехватки лития наблюдаться не будет».

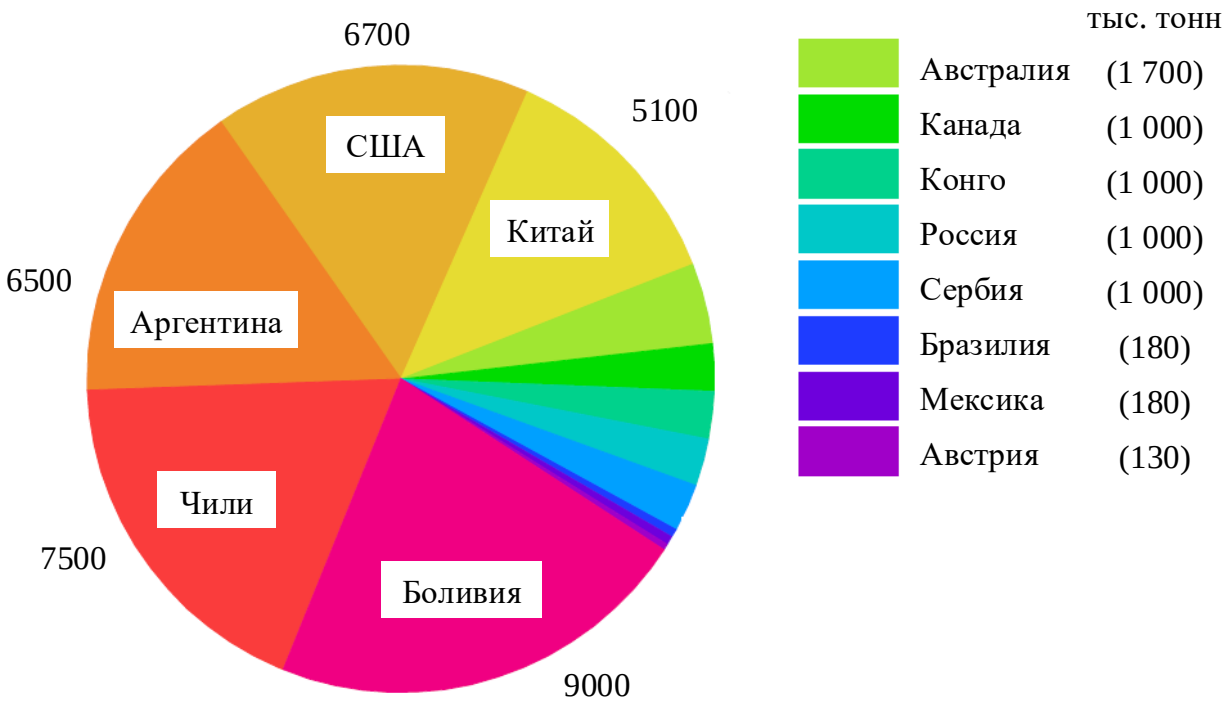


Рисунок 1.12. Выявленные мировые запасы лития на 2015 г.

Источник: [109]

Помимо вышеизложенной количественной оценки, необходимо также принять во внимание третий аспект, описанный Зедерман и др. в [101] следующим образом: недостаточно определить, сколько материала будет доступно [долгосрочная перспектива, ресурсы] и когда он может быть поставлен [краткосрочная перспектива, производство], но также – кому [географически] он доступен. Инвестиционный банк «Голдман Сакс» уже назвал литий «новым бензином», «основным фактором, обеспечивающим революцию электрических транспортных средств» [132]. Помимо важности для

транспортного сектора, эта аналогия также распространяется на географическую концентрацию запасов. Как показано на рисунке 1.12, более половины разведанных запасов (41 миллион тонн) находятся в Боливии, Аргентине и Чили, еще 16 % и 12 % – в США и Китае соответственно. В своем исследовании Зедерман и др. делают вывод о том, что: «международный спрос на литиевые батареи может привести к возникновению большого капиталоемкого парка автомобилей и связанных с ними производственных систем, уязвимых к недостатку ресурса, еще более сконцентрированного в небольшом количестве стран и производителей, чем в случае существующей сегодня системы производства нефти. Более двух третей земных ресурсов, рассматриваемых в нашем исследовании, сконцентрированы на небольшой территории, на которой находятся Чили, Боливия и Аргентина, а возможность экспорта по большему счету обеспечивает единственный чилийский порт» [101]. Это мнение разделяют Эйбелл и Оппенгеймер [102].

Обобщая, можно сказать, что с учетом результатов этой количественной оценки в обозримом будущем появления «аккумуляторной батареи пиковой мощности» ожидать не приходится. Географическая концентрация при этом связана с возможными геополитическими проблемами, аналогичными тем, которые имеют место в связи с концентрацией нефти. Существенным отличием здесь является то, что литий не расходуется безвозвратно, а может быть возвращен в производство путем переработки.

Водородные топливные элементы

Материалом, наиболее важным для массового производства FCEV, считается платина (Pt) [133]. Вопросы, связанные с ее запасами и производством, будут рассмотрены с использованием того же подхода, который использовался для анализа материалов, необходимых для изготовления литиевых аккумуляторных батарей. Платина, металл серебристо-белого цвета,

играет важнейшую роль в качестве катализатора[23] реакций восстановления кислорода и окисления водорода в топливных элементах на основе протонообменных мембран (PEMFC) [134]. Для производства выпускаемых сегодня моделей FCEV, например Toyota Mirai®, требуется примерно 22–38 г платины на ТС [121] (0,2−0,3 $г_{Pt}$/кВт/ч)[24]. Уже сейчас заметно существенное снижение потребности в платине (на 60–80 %) по сравнению с предыдущим десятилетием [135, 136].

Количества FCEV, которые можно изготовить с использованием одной трети текущего объема производства платины и ее запасов при использовании в количествах 30 (SoA), 20 и 10 $г_{Pt}$/ТС, показаны на рисунке 1.10. С учетом меньших количеств используемой платины (20 и 10 г/ТС) мировые запасы не представляют собой проблемы, тогда как общее производство сталкивается с проблемами, аналогичными производству лития и кобальта при производстве BEV в случае, если объемы производства останутся на сегодняшнем уровне. В отличие от материалов для производства аккумуляторных батарей расширение поставок платины считается «маловероятным» [133].

Географическая концентрация еще более усугубляет этот мрачный прогноз: «Бо*л*ьшая часть ЭПГ [элементов платиновой группы], разведанных в ходе изысканий, лежит в двух магматических интрузиях, в Бушвелдском комплексе – Грейт Дайк (на территории ЮАР и Зимбабве), и в горнодобывающем районе Норильск – Талнах в России [201]» – Геологическое обследование Геологической службы США [138]. Уязвимость цепочки поставок вследствие такой концентрации проявилась в 2014 г., когда забастовка в ЮАР привела к существенному снижению объемов добычи (рис. 1.13). Но есть и позитивный момент – высокий уровень повторного использования платины, который к 2015 г. увеличился до примерно 35 тонн, или 20 % объемов добычи[25].

[23] Холтон и Стивенсон [134] опубликовали подробную статью об использовании платины в водородных топливных элементах.
[24] Топливный элемент Toyota Mirai® обеспечивает максимальную мощность 114 кВт [84].
[25] В 2015 г. расчетный объем повторно использованных ЭПГ составил 125 тонн [139]. В 2010 г. содержание платины по расчетам составляло 28 % ЭПГ [140].

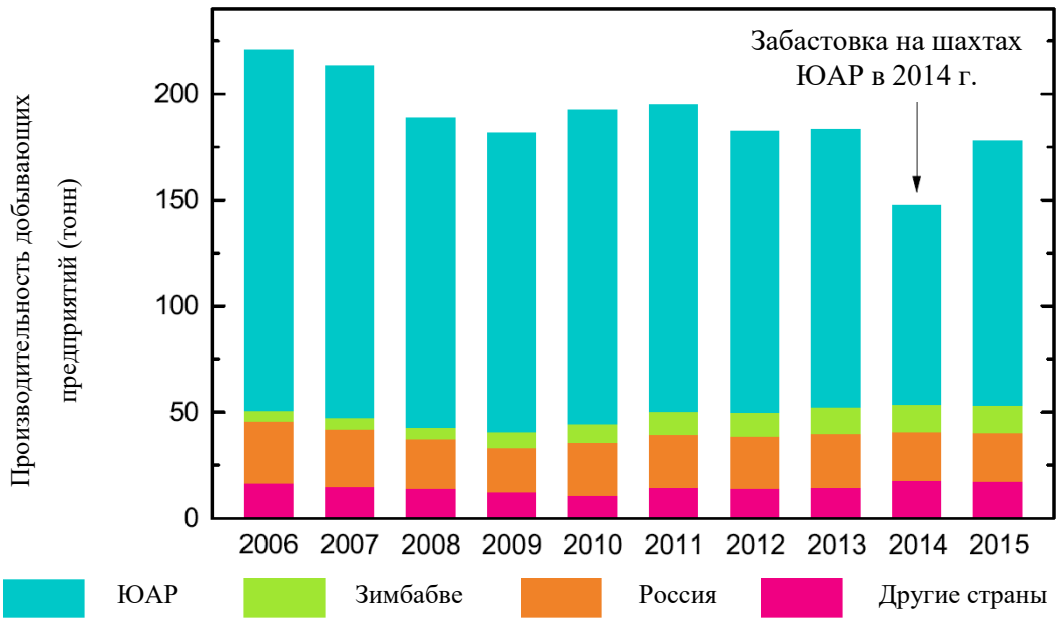


Рисунок 1.13. Мировая добыча платины за период с 2006 по 2015 г.

Источник: [139]

В 2014 г. консалтинговая компания Roland Berger указывала на то, что платина является «центральной проблемой всего производства топливных элементов» [133]. Авторы заявляли, что «стоимость [топливных элементов] и технологических решений на основе платины будут ограничивать внедрение на массовый рынок» FCEV. Одним из основных выводов из их анализа было, что массовое производство FCEV приведет к существенному увеличению спроса на платину и к соответствующему повышению цен. Для Toyota Mirai стоимость платины составляет до 990–1 700 долл. на автомобиль[26], с учетом средней за 10 лет цены в 1 400 долл. за тройскую унцию [27] (≈ 45 долл./грамм) [143].

В еще одной обзорной статье Грегер и др. [121] пришли к аналогичному заключению: «необходимым условием для крупномасштабного коммерческого распространения FCEV является снижение количества платины путем применения более активного катализатора на основе этого материала и (или) путем повышения отдачи энергии ПОМ [протонообменными мембранами]». Авторы также описывают две взаимодополняющие альтернативы

[26] Для сравнения: консалтинговая компания McKinsey & Co. подсчитала, что в 2012 г. общая стоимость компонентов стандартного среднегабаритного пассажирского автомобиля в США составляла около 13 400 долл. на ТС [141].

[27] Тройская унция = 31,1035 г [142].

продолжающимся усилиям по уменьшению содержания платины в компонентах автомобиля: «i) замена платинового катализатора водородных топливных элементов на катализатор без использования МПГ [металлов платиновой группы][28]; либо ii) переход к водородным топливным элементам на основе щелочной мембраны, для которых доступны катализаторы реакций восстановления кислорода, не использующие ЭПГ, но пока не разработан катализатор окисления водорода [144]. В настоящее время, однако, уровень развития этих двух технологий, особенно последней из них, далек от такого, который позволил бы использовать их в FCEV, питаемых водородом».

Электродвигатели

Эффективность электродвигателя очень важна для электрических транспортных средств, так как дальность пробега BEV и FCEV имеет линейную зависимость от этого показателя. Двигатели с постоянным магнитом[29], использующие композитные материалы из редкоземельных элементов, например, неодим (Nd), празеодим (Pr) и диспрозий (Dy), обладают не только высокой эффективностью, но и высокой мощностью и интенсивностью крутящего момента [146–148]. Они установлены в Toyota Prius 2016 г. в. [149], Chevy Spark 2013 г. в. [150] и Nissan Leaf 2012 г. в. [151–153]. Брэдшо и др. [154] утверждают: «вследствие высокой остаточной индукции и коэрцитивности борид неодим-железа ($Nd_2Fe_{14}B$), полученный Сагавой в 1983 г. [155], в настоящее время является предпочтительным материалом для изготовления синхронных двигателей [...]. Этот материал также обычно содержит празеодим и диспрозий (а также, возможно, некоторые количества тербия). Диспрозий представляет большую важность, так как он позволяет повысить коэрцитивность и диапазон выдерживаемых температур».

[28] Включают платину, палладий, родий, рутений, иридий и осмий. Также называются «элементы платиновой группы».
[29] Дополнительные материалы: Чан и Чау [145], разд. 5.4 Приводы электродвигателей с постоянным магнитом.

В своей новой статье авторы делают заключение, что «ситуация с предложением в долгосрочной перспективе не является серьезным ограничением. Кроме того, ожидается, что в будущем повторное использование также будет играть важную роль, однако относительно небольшие количества, используемые в настоящее время, означают, что этот процесс не будет достаточно масштабным еще несколько лет. При этом актуальной проблемой является монополия[30] Китая, которая, согласно оценкам наблюдателей, несмотря на попытки развитых стран диверсифицировать поставки, будет сохраняться еще по меньшей мере два десятилетия!» [154].

В 2013 г. Хендердаал и др. [157] пришли к аналогичному заключению: «Было установлено, что в краткосрочной перспективе (до 2000 г.) можно ожидать дефицита диспрозия ввиду вероятного превышения спроса над предложением [...]. Однако в долгосрочной перспективе следует ожидать, что запасы диспрозия в земной коре будут достаточными для удовлетворения совокупного спроса на диспрозий до 2050 г., даже без учета возможного повторного использования. Поэтому в течение периода, рассматриваемого в этом исследовании, проблемой будет являться не геологический дефицит, но объемы производства». Авторы прогнозируют, что «в будущем ожидается прекращение доминирования Китая на рынке поставок диспрозия по мере ввода в эксплуатацию новых добывающих мощностей за пределами Китая. С учетом прогнозных показателей, в 2020 г. Китай будет обеспечивать 62 % объема поставок по сравнению с 99,8 % в настоящее время, по мере (повторного) открытия шахт в Канаде, Австралии и США. При этом Китай продолжит играть важную роль в производстве диспрозия, так как 70 % запасов этого материала расположены на территории этой страны».

Расширение мощностей производства РЗЭ и их повторное использование[31] составляют две части решения проблемы их нехватки. Третья часть заключается в разработке конструкций «гибридных двигателей», не

[30] «В настоящее время Китай является крупнейшим мировым производителем редкоземельных элементов, обеспечивая более 95 % общемирового производства [РЗЭ]» [156].
[31] По состоянию на 2011 г. повторно использовалось менее одного процента редкоземельных элементов [158].

использующих РЗЭ. В отчете, опубликованном недавно Риба и др. [147], утверждается, что ходовые двигатели, не использующие РЗЭ, «могут достигать аналогичных характеристик – интенсивности крутящего момента, эффективности или постоянной механической мощности в сравнении с текущими моделями двигателей с использованием редкоземельных элементов. Кроме того, некоторые конструкции таких новых двигателей обладают и другими интересными особенностями, такими как меньшая стоимость, большая прочность, возможность работы при высоких температурах, отсутствие размагничивания, более широкий диапазон скоростей при постоянной мощности и повышенная эффективность [...]. Таким образом, если учесть все другие аспекты, такие как эффективность, стоимость материалов и риски, связанные с поставками, двигатели, не использующие РЗЭ, могут быть конкурентными по отношению к двигателям, использующим эти материалы». Два из трех наиболее продаваемых в США ЭТС [159] уже оснащены двигателями альтернативной конструкции: BMW i3 основана на двигателе гибридного дизайна, требующем гораздо меньших количеств РЗЭ. Tesla model S имеет медный индукционный роторный двигатель, в котором РЗЭ не используются вовсе [160].

Обзор литературных источников позволяет утверждать, что РЗЭ, по-видимому, будут оставаться проблемным (и определяющим стоимость) аспектом в цепочке поставок ЭТС. Это обстоятельство, однако, гораздо сильнее связано с географической концентрацией и соответствующей сильной торговой позиции стран, чем физическое ограничение доступных ресурсов. При всем при этом не ожидается, что РЗЭ станут препятствием для массового производства ЭТС, так как на рынке появились новые конструкции двигателей со сниженным потреблением РЗЭ или вовсе без них.

2. Преобразование энергии

Помимо электроэнергии, поставляемой сетями энергоснабжения (см. подразделы 3.3.1 и 3.3.2) возможно развертывание в регионах мощностей по генерации электричества от солнечной и ветровой энергии с целью обеспечения их энергетических потребностей. Эти два процесса описаны в первом подразделе 2.1 данного раздела, посвященном трансформации энергии. Соответственно, во втором подразделе 2.2 изложена обзорная информация о доступных технологиях, призванных удовлетворить потребности регионов в отоплении. Наконец, в третьем подразделе 2.3 разъясняются основные принципы процессов, происходящих при электролизе водорода, работе топливных элементов и использовании технологии Power2Gas.

2.1. Возобновляемые источники энергии

В данном подразделе излагается краткое описание систем генерации солнечной и ветровой энергии в Германии и Калифорнии, а также исходные параметры, использованные при моделировании. Управляемые возобновляемые источники энергии (например, биомасса) не рассматриваются.

2.1.1. Солнечная энергия

На конец 2015 г. в Германии были установлены генерирующие системы совокупной мощностью 39 ГВтп [167]. Эта мощность почти в три раза выше, чем в Калифорнии, где (несмотря на более выгодные погодные условия) установлены системы общей мощностью 13 ГВт [12]. Более того, стоимость солнечных панелей, устанавливаемых на крыше, в Германии ниже примерно на 1 900 долл/кВтп в 2015 г. (среднее значение [161–164]), чем в Калифорнии, где эта стоимость составляет примерно 4 700 долл/кВтп (среднее значение [166, 168]). Большая разница в стоимости тем более удивительна, если учесть снижение стоимости фотоэлектрических панелей до уровня менее

700 долл/кВтп [163, 164, 168, 169], которое в Европе и США примерно одинаково, так как большая часть солнечных панелей импортируется из стран Азии[32]. Одним из ключевых элементов более низкой стоимости в Калифорнии является существенное снижение стоимости монтажа[33], составляющей 3 300 долл/кВтп.

Таблица 2.1. Исходные параметры для расчетов фотоэлектрических панелей жилых домов

Солнечные панели	inv-cost DE	inv-cost CA	Фиксированные расходы	Срок эксплуатации
2015	1900	4700		
2025	1400	2000	2	20
2035	1000	1000		

Источники: расчеты стоимости солнечных панелей (с учетом монтажа) в Германии на 2015 г. основаны на [161–164], данные для Калифорнии – на: [165, 166]. Расчеты для 2025 и 2035 гг. для Германии основаны на [164] (1 900 долл/кВтп в 2015 г., а также расчетное снижение расходов за период с 2015 по 2035 г. на уровне около 45 % [164]). Расчет стоимости на 2025 г. для Калифорнии основан на [165]. Предполагается, что к 2035 г. расходы для Калифорнии сравняются с уровнем расходов для Германии. Фиксированные расходы основаны на [162]

Выработка энергии фотоэлектрическими батареями зависит в основном от падающего солнечного излучения E (Вт/м^2) и от (зависящей от интенсивности излучения) температуры T_{PV} (°C) солнечной батареи. Исходные временные ряды для имитационной модели были рассчитаны на основе почасовых профилей совокупного горизонтального облучения $E_{GHI}(t)$ (Вт/м^2; СГИ) с помощью трехэтапного процесса.

1. Временной ряд для плоскости батареи *E(t)*

С целью обеспечения максимального[34] падающего излучения *E* солнечные панели монтируются под некоторым горизонтальным углом ориентации φ и вертикальным углом наклона α, по сравнению с E_{GHI} для плоской горизонтальной поверхности. *E(t)* называется временным рядом для

[32] Семь из десяти крупнейших производителей размещаются в Китае, два – в Японии, и один – в Канаде [170].
[33] Стоимость монтажа составляет 70 % стоимости с установкой; среднее значение по США [168].
[34] Оптимальные значения углов φ и α определяются траекторией движения солнца при его прохождении по небу, которая зависит от географического положения.

плоскости батареи (ПБ), определяемым для солнечной панели, установленной на наклонной крыше. Расчет выполняется с использованием подхода, описанного в книге Regenerative Energiesysteme, написанной Фолкером Квашнингом [171].

2. Временной ряд температуры фотоэлектрической панели $T_{PV}(t)$

Второй этап включает расчет температуры солнечной панели T_{PV} с использованием уравнения (5.54), изложенного в упомянутой книге [171]. Значение параметра T_{PV} можно рассчитать исходя из излучения $E(t)$ на ПБ, температуры наружного воздуха $T(t)$ и коэффициента пропорциональности c (°C). Значение последнего зависит от вида системы крепления установки. Для установки с задним вентилированием оно было принято равным c = 30,5 °C.

$$T_{PV}(t) = T(t) + c \cdot \frac{E(t)}{E_{stc}} \tag{2.1}$$

Индекс STC в уравнении (2.1) означает «стандартные условия испытаний», определяемые в стандарте DIN EN 60904-3 [172]. Эти условия таковы: излучение E_{STC} = 1 000 Вт/м^2; спектральный состав солнечной радиации соответствует показателю воздушной массы 1,5 и модулю температуры T_{STC} = 25 °C.

3. Временной ряд выходной мощности электроэнергии $P_m(t)$

На основании ранее рассчитанных временных рядов для $E(t)$ и $T_{PV}(t)$ можно рассчитать значение выходной мощности электроэнергии $P_m(t)$ (в ваттах) с использованием «улучшенной модели “мощность – температура” с коррекцией нелинейности излучения», разработанной Б. Марион [173]. Зависимость P_m от излучения E и температуры наружного воздуха T проиллюстрирована на рисунке 2.1.

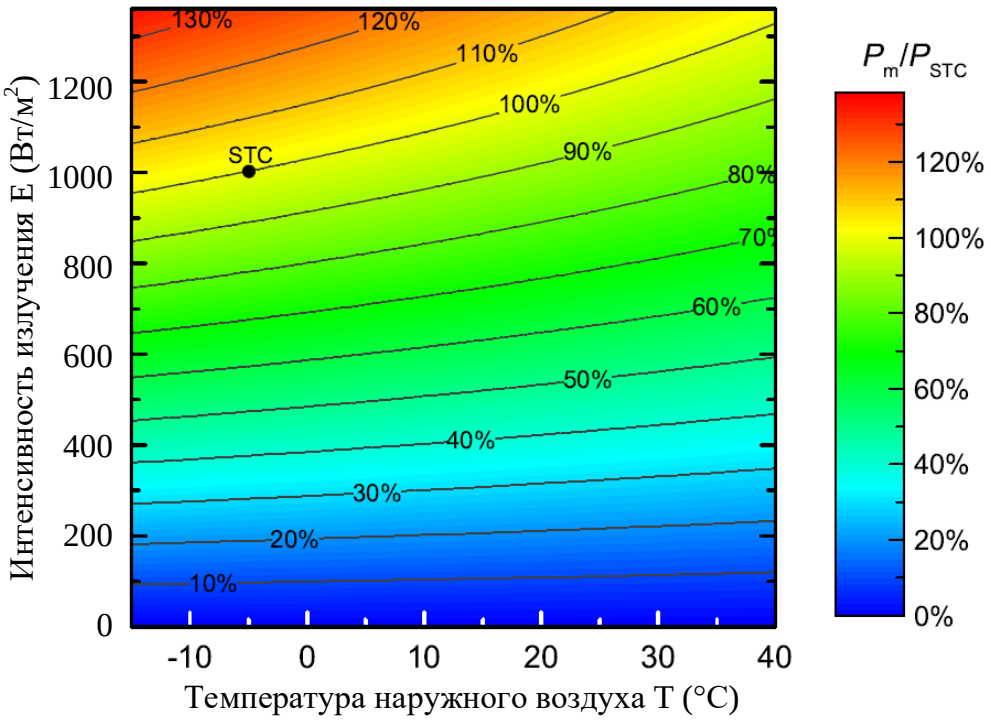


Рисунок 2.1. Нормализованная (по P_{STC}) выработка электроэнергии эталонной солнечной панелью в зависимости от интенсивности излучения E и температуры внешней среды T: по уравнениям (2.1) и (2.2). Иллюстрации показывают, что показатель STC слабо отражает реальные условия для систем, устанавливаемых на крыше. Для достижения номинальной мощности (100 %) при E = 1 000 Вт/м^2, необходима температура внешнего воздуха T = -5 °C

$$P_m(t) = \begin{cases} P_{STC} \cdot \left[\frac{E(t)}{E_{STC}} \cdot [1 + \gamma \cdot (T_{pv}(t) - 25\,°C)] - k \cdot \frac{E_{STC} - E(t)}{E_{STC} - 200\frac{W}{m^2}} \right] & \text{для } E(t) > 200\frac{W}{m^2} \\ P_{STC} \cdot \left[\frac{E(t)}{E_{STC}} \cdot [1 + \gamma \cdot (T_{pv}(t) - 25\,°C)] - k \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{E(t)}{200\frac{W}{m^2}} \right)^4 \right] \right] & \text{для } E(t) \leq 200\frac{W}{m^2} \end{cases} \quad (2.2)$$

Параметр γ (1/°C) – это температурный коэффициент максимальной мощности P_m, переменная k (−) описывает поправочный коэффициент излучения для низких уровней излучения в соответствии с DIN EN 60904-1 [174]. Эти значения обычно предоставляются производителем в спецификации на соответствующую модель солнечной панели. Значения для эталонной системы, использовавшиеся в настоящей работе, модели YGE 60 Cell 40mm SERIES производства компании Yingli Green Energy [175] таковы: γ = -0,0045/°C; k = 0,05. Нормализованный исходный временной ряд R(*t*, солн.) для

имитационной модели был рассчитан путем деления $P_m(t)$ на $\max_t P_m(t)$ для каждого региона.

2.1.2. Ветровая энергия

Солнечные панели могут получать энергию почти в любом месте планеты, однако возможности генерации ограничены световым днем. Ветряные энергетически установки, напротив, могут вырабатывать электроэнергию и ночью, однако мест с постоянными ветрами меньше, особенно вблизи от населенных пунктов. На конец 2015 г. в Германии вырабатывалось всего около 42 ГВт ветровой энергии (39 ГВт на суше и 3 ГВт на море) [231]; в Калифорнии этот показатель составил 6 ГВт [182].

Таблица 2.2. Исходные параметры ветряных энергетических установок

Ветряная электростанция	inv-cost	Фиксированные расходы	Срок эксплуатации
	$\beta^{\text{inv}}_{\text{turb}}(\$/\text{kW})$	$\beta^{\text{fix}}_{\text{turb}}(\%_{\text{inv}})$	L_{turb} (a)
2015	1600		
2025	1450	2	20
2035	1300		

Источники: Расчет и прогнозы стоимости основаны на [176–180]. Годовая стоимость эксплуатации и технического обслуживания лежит в диапазоне 1,5–3 % (согласно [181])

Для расчетов в настоящей работе в качестве эталонной принята турбина Enercon E82 (номинальная мощность $P_{\max}$ = 2 050 кВт, высота оси h = 108 м, радиус ротора r = 41 м [10]). В 2014 г. модель E82 являлась наиболее продаваемой моделью ветроустановок лидера рынка наземных систем компании Enercon [183, 184].

Временной ряд $P_{\text{turb}}(t)$ генерации ветровой энергии для эталонной установки был рассчитан для каждого региона[35] на основе закона Беца (2.3), [185 стр. 69]. Согласно этому закону, выходная мощность зависит от кинетической энергии ветра на высоте оси h_{hub} = 108 м, которую можно

[35] Кроме района г. Лос-Альтос-Хиллз, для которого эти расчеты не выполнялись, см. подраздел 3.2.

рассчитать из скорости ветра $v_{hub}(t)$ (м/с) и плотности воздуха $\rho_{hub}(t)$ (кг/м^3) на площади ротора $A = \pi \cdot r^2$ (м^2).

$$P_{Betz} = \frac{A \cdot \rho_{hub}(\rho_{hub}, T_{hub}) \cdot V_{hub}^3 \cdot C_p(v_{hub})}{2} \quad (2.3)$$

Временные ряды скорости ветра $v_2(t)$, давления ветра $p_2(t)$ (кг/(м $\cdot$ с^2)) и температуры воздуха $T(t)$ (K), полученные из данных метеостанций, были зафиксированы на высоте немного выше земли h_2, т. е. 2,0–2,5 м. Поэтому эти значения были приведены к высоте оси h_{hub} с помощью трехэтапного процесса.

1. Плотность воздуха на высоте оси $\rho_{hub}(t)$

На первом этапе была рассчитана примерная плотность воздуха h_2 для каждого такта времени t на основе закона идеального газа (2.4), а затем рассчитаны временные ряды давления воздуха $p_2(t)$ и температуры наружного воздуха [36] $T(t)$. Дополнительные параметры включают молярную массу воздуха M_{air} = 28,97 г/моль [187], универсальную газовую постоянную R (J/(моль$\cdot$ K)) и нормальную силу тяжести g (м/с^2):

$$\rho_2(t) = \rho_2\left(\rho_2(t), T(t)\right) = \frac{\rho_2(t) \cdot M_{возд}}{R \cdot T(t)} \quad (2.4)$$

Далее была рассчитана плотность воздуха $\rho_{hub}(t)$ (кг/м^3) на высоте оси ротора по барометрической формуле 4.20 [188, стр. 369]:

$$\rho_{hub}(t) = \rho_2(t) \cdot \exp\left(-\frac{(h_{hub} - 2\ \text{m}) \cdot M_{возд} \cdot g}{R \cdot T(t)}\right) \quad (2.5)$$

2. Скорость ветра на высоте оси $v_{hub}(t)$

Независимо от ρ_{hub} была рассчитана скорость ветра на высоте оси $v_{hub}(t)$ на основе уравнения Гелльмана, (2.6) [189, стр. 523], [171, стр. 278, 279].

[36] Допущение: $T_2(t) = T_{hub}(t) = T(t)$ (изотермическая) на основе [186], где указано, что в приземном слое атмосферы $T(h)$ изменяется на ≈ 0,01 K/м.

$$V_{\text{hub}}(t) = v_2(t) \cdot \left(\frac{h_{\text{hub}}}{2\ \text{м}}\right)^{\alpha} \tag{2.6}$$

Экспонента Гелльмана α (−) – это мера стабильности воздушного потока и топологи местности[37]. Использование указанных в литературных источниках значений экспоненты Гелльмана для населенной местности (α = 0,27 – 0,60) стало причиной того, что расчетные значения скорости ветра и соответствующий выход мощности для Линкольна и Пуцбрунна гораздо выше, чем значения, которые можно было бы получить, если использовать официальные карты ветров. Возможное объяснение состоит в том, что измерительные датчики расположены в «ветронасыщенных» местах, что приводит к возникновению системной ошибки при расчетах по уравнению (2.6). Чтобы обеспечить учет реалистичных параметров ветра, значение экспоненты α было скорректировано с учетом времени полной ветровой нагрузки, *H* (ч) (2.7), соответствующего официальным картам ветров[38].

$$\text{H} = \frac{\sum_t \text{P}_{\text{el}}(t)}{\text{P}_{\text{max}}} \tag{2.7}$$

3. Выход мощности $P_{\text{turb}}(t)$

На основе ранее рассчитанных временных рядов $\rho_2(t)$ и $v_{\text{hub}}(t)$, а также коэффициента мощности $C_p(v_{\text{hub}})$ (−) эталонной ветрогенераторной установки (рис. 2.2) становится возможным определить $P_{\text{turb}}(t)$ (Вт) на основе закона Беца (2.3):

$$P_{\text{turb}} = \begin{cases} P_{\text{Betz}}(t) = \dfrac{A \cdot \rho_{\text{hub}}(p,T) \cdot V_{\text{hub}}^3 \cdot C_p(v_{\text{hub}})}{2} & \text{для } P_{\text{Betz}}(t) \le P_{\text{max}} \\ P_{\text{max}} = 2050\ \text{kW} & \text{для } P_{\text{Betz}}(t) > P_{\text{max}} \end{cases} \tag{2.8}$$

[37] Пример для нейтральной устойчивости воздушных масс: в открытом море α = 0,1; в населенных районах α = 0,34 [185, стр. 81].
[38] Пуцбрунн: α = 0,1332 при *H* = 1 200 ч [190], Ноймаркт: α = 0,3445 при *H* = 2 000 ч [190], Линкольн: α = 0,0874 при *H* = 1 500 ч [191–194].

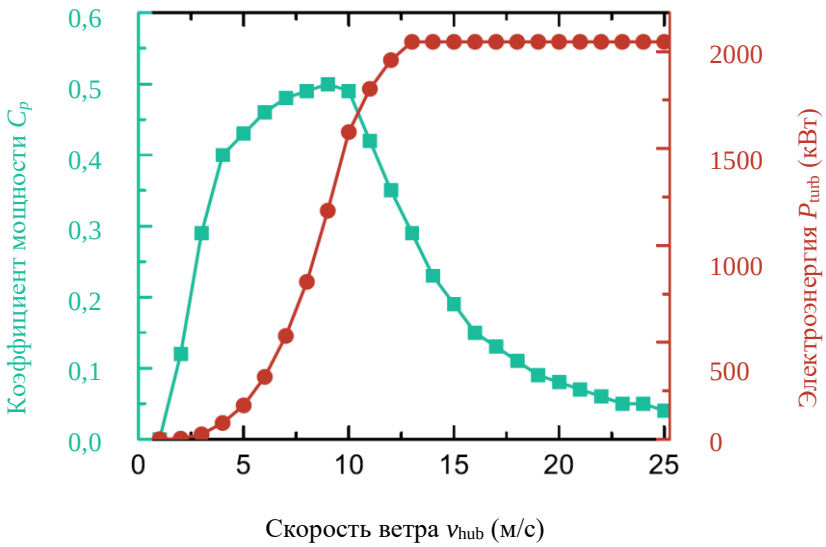


Рисунок 2.2. Выход мощности P_{turb} эталонной ветроустановки при силе ветра v_{hub}, коэффициенте мощности $C_p(v_{hub})$ и плотности воздуха ρ = 1,225 кг/м^3. Коэффициент мощности $C_p(v_{hub})$ был указан в технических характеристиках эталонной ветрогенераторной установки [10]

Аналогично расчетам для солнечной энергии последним этапом подготовки данных для имитационной модели стал расчет нормализованного временного ряда $R(t$, ветер) путем деления $P_{turb}(t)$ на $\max_t P_{turb}(t)$.

2.2. Выработка тепловой энергии

После рассмотрения технологий генерации электроэнергии ранее, в данном разделе излагается информация о технологических решениях выработки тепловой энергии, использованных в имитационной модели. На основе текущего набора технологических решений, используемых для удовлетворения потребностей регионов в обогреве, в имитационной модели были реализованы четыре процесса (резистивный нагрев, тепловые насосы, обогрев путем сжигания мазута и газа).

2.2.1. Нагрев путем сжигания ископаемых видов топлива

Сжигание углеводородов (топочного мазута и природного газа) закрывает большую долю потребностей в отоплении в Германии и Калифорнии

(подраздел 3.1.2). Тогда как топочный мазут обычно хранят в хранилищах, расположенных вблизи от топочных печей, большинство газовых топок подключены к сети подачи природного газа. Сжиженный (в баллонах) пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}) и сжиженный нефтяной газ (СНГ[39]) являются альтернативами, обеспечивающими отопление более удаленных районов, не имеющих доступа к сети распределения природного газа.

Таблица 2.3. Исходные параметры систем отопления на основе сжигания ископаемых видов топлива

Отопление газом	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации	Интенсивность выделения CO_2
	$\beta^{inv}_{boilg}(\$/kW)$	$\beta^{fix}_{boilg}(\%_{inv})$	$\eta_{boilg}(\%)$	L_{boilg} (a)	$\Phi_{boilg}(g/kWh_{ch})$
2015/25/35	900	2	85	20	190
Отопление мазутом	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации	Интенсивность выделения CO_2
	$\beta^{inv}_{boilo}(\$/kW)$	$\beta^{fix}_{boilo}(\%_{inv})$	$\eta_{boilo}(\%)$	L_{boilo} (a)	$\Phi_{boilo}(g/kWh_{ch})$
2015/25/35	1100	2	85	20	270

Источники: расчеты стоимости основаны на данных из нескольких литературных источников [195–199]. Было принято допущение, что результаты за следующие два десятка лет не изменятся, с учетом того, что эти технологии используются уже несколько десятилетий и воспроизводятся в широком масштабе. Эффективность была рассчитана на основе [200–202], с учетом того, что эксплуатация при пониженных нагрузках ведет к более низкой годовой эффективности. Данные по выбросам углекислого газа основаны на средних значениях для природного газа и топочного мазута, указанных в [8, 203], то есть: 190 г/кВт/ч$_{ch\text{-}ngas}$ и 270 г/кВт/ч$_{ch\text{-}oil}$ соответственно. Таким образом, получаем 224 г/кВт/ч$_{th}$ (пгаз) и 318 г/кВт/ч$_{th}$ (мазут)

Эффективность процесса сжигания существенно варьирует в течение года в зависимости от погодных условий и загрузки печи: в зимние месяцы эффективность может достигать 95 %, а в летние, когда топочные печи используются в основном для снабжения горячей водой, – падать до 60 % [8]. Так как зимой поставляется больше энергии, чем летом, для расчетов, основанных на [200–202], была принята средняя эффективность, равная 85 %.

[39] Основные составляющие СНГ – пропан и бутан.

2.2.2. Нагревание электричеством, Power2Heat

Электрические отопительные системы либо трансформируют электрическую энергию в тепловую посредством омического (резистивного) нагрева, либо приводят в движение электроприборы, включенные в термодинамический цикл, которые переносят тепло от одного объекта к другому (тепловые насосы)[40].

Таблица 2.4. Исходные параметры электрических систем отопления

Резистивный нагрев	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации
	$\beta_{resi}^{inv}(\$/kW)$	$\beta_{resi}^{fix}(\%_{inv})$	$\eta_{resi}(\%)$	L_{resi} (a)
2015/25/35	450	2	100	20
Тепловой насос, использующий теплоту воздуха	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации
	$\beta_{hpump}^{inv}(\$/kW)$	$\beta_{hpump}^{fix}(\%_{inv})$	$\eta_{hpump}(\%)$	L_{hpump} (a)
2015	1700		2,80	
2025	1600	2	3,25	20
2035	1500		3,50	

Источники: ввиду отсутствия надежных данных по резистивному обогреву капиталовложения для резистивного отопления были приняты на уровне 50 % от стоимости газонагревательной системы, взятой из [204, 205]. Значения стоимости и эффективности тепловых насосов являются расчетными величинами для теплового насоса, использующего теплоту воздуха [206] (основной источник), а также [207, 208]. Фиксированные расходы были рассчитаны по аналогии с другими системами обогрева

В системах резистивного нагрева напряжение U (В) используется для протекания электрического тока I (А) через проводник, имеющий сопротивление R (Ом). Для резистивного проводника ($U = R \cdot I$) выделяемую тепловую энергию («джоулево тепло») P_{th} (W) можно рассчитать по уравнению $P = U/I$ [211].

$$P_{th} = U \cdot I = R \cdot I^2 \tag{2.9}$$

[40] Нагрев, основанный на эффекте Пельтье (термоэлектрический обогрев) – еще один возможный процесс нагревания, который, однако, на сегодняшний день для обогрева зданий широко не используется.

Резистивные системы обогрева помещений внутри здания имеют 100%-ю эффективность, так как рассеиваемая электрическая энергия полностью преобразуется ими в тепло [212].

Тепловые насосы, наоборот, извлекают тепловую энергию из окружающей среды и переносят ее в пространство, которое нужно обогреть. Термодинамический цикл, лежащий в основе этого процесса, показан на рисунке 2.3. На первом этапе рабочая среда испаряется и нагревается за пределами здания. При этом из окружающей среды извлекается энергия Q_{out} (Дж). После этого полученный газ сжимают (работа W (Дж)) для увеличения температуры кипения среды T_{boil}. Снаружи здания газ частично конденсируется при повышенной температуре кипения, передавая таким образом внутрь здания энергию $Q_{in} = Q_{out} + W$ (принимая за данное адиабатические условия протекания процесса, при которых потери тепла от компрессора также передаются в здание). На четвертом этапе осуществляется релаксация жидкости с помощью расширительного вентиля, и цикл повторяется. Более подробное описание процессов, лежащих в основе работы теплового насоса, приведено в [213].

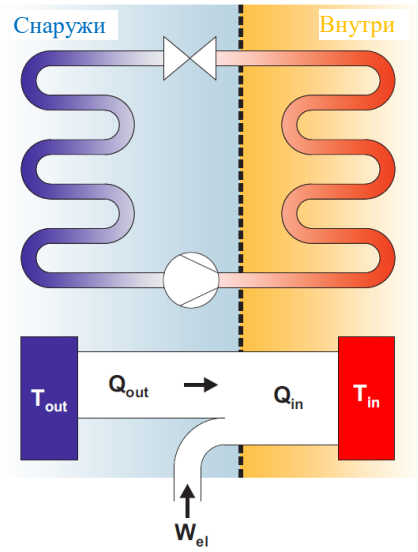


Рисунок 2.3. Цикл работы теплового насоса

Источники: Иллюстрация создана на основе [208–210]

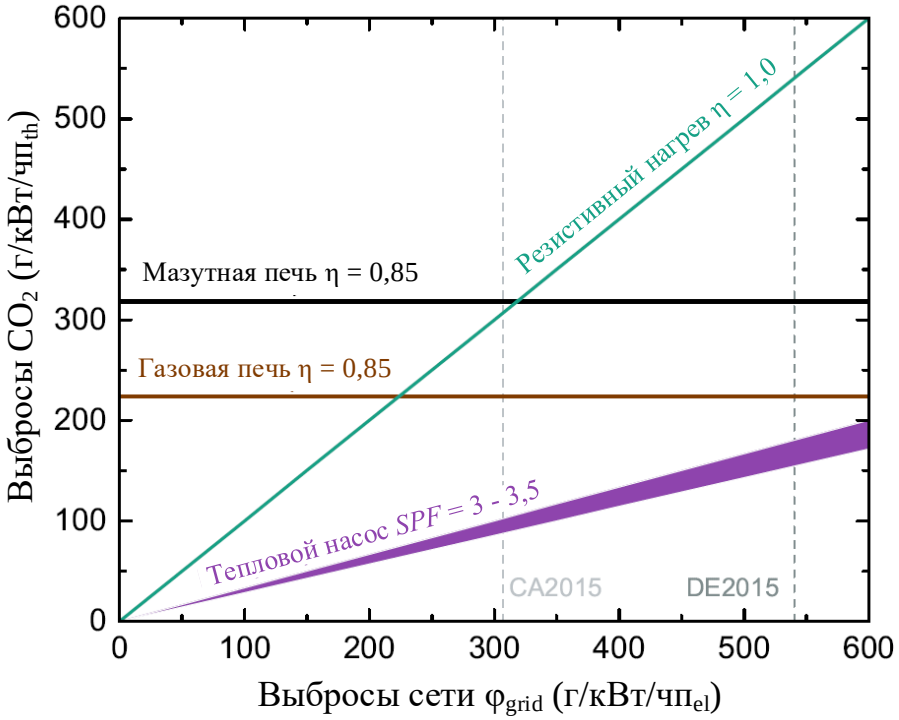


Рисунок 2.4. Выбросы углекислого газа, производимые разными системами отопления, анализируемыми имитационной моделью, в зависимости от выбросов сети φ_{grid}. Показатели DE2015 и CA2015 отражают интенсивность выбросов углекислого газа при выработке электричества в DE и CA в 2015 г.

Эффективность теплового насоса описывается его «коэффициентом эффективности работы» (*COP* (−)), который определяется как отношение энергии, переносимой внутрь помещения Q_{in} к полной работе компрессора *W*.

$$COP = \frac{Q_{in}}{W} = \frac{Q_{out} + W}{W} \tag{2.10}$$

Тепловая энергия Q_{out}, которая может быть извлечена из окружающей среды, зависит от наружной температуры T_{out}. Это значит, что значение показателя *COP* изменяется в течение года $(1\text{a} \triangleq t \in [1;8760]\text{h})$. Имитационная модель использует среднегодовое значение *COP* (2.11), «сезонный коэффициент эффективности работы» *SPF* (−).

$$SPF = \sum_{t=1}^{8760} COP(t) \tag{2.11}$$

С учетом текущих выбросов при генерации энергии в Германии и Калифорнии резистивный обогрев ведет к образованию б*о*льших количеств выбросов, чем в случае обогрева от газовой печи, – как в Германии, так и в Калифорнии (рис. 2.4). С другой стороны, использование тепловых насосов ведет к образованию меньших объемов выбросов, чем в случае обогрева путем сжигания ископаемых видов топлива.

Power2Heat (P2H)

Выбросы углекислого газа, образующиеся при сжигании ископаемых видов топлива для нужд обогрева, составляют существенную долю общих выбросов. В этих случаях объем выбросов зависит от содержания углерода в углеводородном топливе, окисляющемся в процессе сгорания [214, 215]. Вследствие этого снижение выбросов углекислого газа для систем обогрева, основанных на сжигании топлива, ограничено переходом к использованию видов топлива, имеющих меньшее содержание углерода на единицу высвобожденного тепла, т. е. к природному газу (от топочного мазута).

Возможно добиться дополнительного снижения выбросов углекислого газа путем электрификации процесса генерации тепла (рис. 2.4). Таким образом, выбросы углекислого газа, производимые отопительными системами, определяются интенсивностью выбросов углерода системой электроснабжения. Соответствующее соотношение между снижением выбросов углекислого газа электрических систем отопления по сравнению с отоплением посредством сжигания топлива и интенсивностью выбросов углерода систем электроснабжения из сети энергоснабжения φ_{grid} показано на рис. 2.4.

Учитывая растущую долю непостоянной выработки электроэнергии от солнца и ветра, электрические системы отопления также обладают многообещающей гибкостью со стороны потребления. В качестве примера: резистивные электрические нагреватели можно включать и выключать в мгновение ока, так как в них отсутствуют движущиеся части. Тепловые насосы также имеют высокую степень эксплуатационной гибкости, но

несколько более ограничены вследствие наличия в их составе компрессора. Гибкость электрических отопительных систем может быть повышена еще больше, если объединить их с системой аккумулирования тепла (раздел 3).

Использование электрических отопительных систем с целью интеграции прерывистой генерации электроэнергии от ВИЭ часто называют подходом Power2Heat («энергия в тепло»), P2H. Несмотря на наличие различных толкований этого термина [216], чаще всего он означает использование избытков электроэнергии, генерируемых от ВИЭ, выработку которых в противном случае нужно было бы искусственно снижать[41]. *В настоящей работе термин «P2H» используется в его буквальном смысле – преобразование электрической энергии в тепловую без ограничений, связанных с избытками генерируемой мощности.*

Возможно, наиболее эффективным способом обеспечения P2H является использование в сетях отопления котлов с электронагревом [218]. Этот подход аналогичен использованию «промышленных погружных нагревателей», включаемых в периоды выработки энергии от ВИЭ, что позволяет исключить генерацию тепла с использованием ископаемых видов топлива. На сегодняшний день в отопительных сетях Германии установлены системы электрического отопления общей мощностью боле 450 МВт [219].

В отличие от централизованного подхода, применяемого в районных теплоцентралях, подход P2H может быть основан на использовании тепловых насосов[42] [221] и резистивного отопления децентрализованно. Настоящая работа рассматривает только децентрализованный подход вследствие ограничений, связанных с распространенностью сетей отопления[43], а также того факта, что ни в одном из рассматриваемых регионов централизованное отопление не используется.

[41] Подробное исследование выгод, связанных с более тесной интеграцией отопительного и энергетического секторов было проведено Хейлеком в 2015 г. [217].
[42] Начиная с 2013 г. тепловые насосы, реализуемые в Германии, имеют право именоваться «пригодными к использованию в интеллектуальных сетях отопления» в случае, если эти устройства могут дистанционно управляться коммунальными предприятиями и включаются при наличии низких тарифов при избыточной генерации энергии от ВИЭ [220].
[43] В Германии 13,5 % домохозяйств пользуются централизованным отоплением [222].

Обобщая, можно сказать, что подход P2H дает перспективную гибкость на стороне спроса в части интеграции прерывистой генерации энергии от солнца и ветра. Ввиду того, что потребность в отоплении превышает потребление электроэнергии и в Германии, и в Калифорнии, можно также утверждать, что более сильная интеграция электроэнергетического и отопительного секторов предлагает отличные перспективы по исключению искусственного ограничения выработки энергии от ВИЭ, одновременно обеспечивая снижение выбросов углекислого газа в отопительном секторе. Подробное исследование выгод, связанных с более тесной интеграцией отопительного и энергетического секторов, было проведено Кристианом Хейлеком в 2015 г. [217].

2.3. Получение водорода

2.3.1. Метод электролиза

Процесс электролиза ведет свое начало с 1800 г., когда Никольсон и Карлайл построили в Лондоне первый электролизер для разложения воды [226–228]. В течение последующих 150 лет электролиз стал основным способом получения водорода. Ситуация изменилась к середине XX века, когда процессы, основанные на использовании ископаемых видов топлива, например, газификация угля и конверсия метана с водяным паром (SMR), позволили вырабатывать водород в больших объемах и с низкими затратами [229, 230]. Сегодня электролиз обеспечивает лишь 4 % совокупной потребности в водороде, составляющей 26–54 Мт (290–600 млрд $м^3$) [231–234]. Далее изложены основы технологии электролиза, основные принципы работы щелочных электролизеров и электролизеров с мембраной из полимерного электролита, их экономические параметры, а также раскрываются возможности совместной выработки тепла и водорода.

Таблица 2.5. Исходные параметры для щелочных электролизеров и электролизеров с мембраной из полимерного электролита

	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации
	$\beta_{ely}^{inv}(\$/kW_{H2})$	$\beta_{ely}^{fix}(\%_{inv})$	$\eta_{ely}(\%_{LHV})$	L_{ely} (a)
2015	2000		58	
2025	1400	4	63	15
2035	1000		66	

Источники: inv-cost, 2015 г.: [6]. Прогнозы предполагают снижение расходов на 30 % к 2025 г. и еще на 50 % – к 2035 г. (основаны на [223], где спрогнозировано падение расходов на 50 % к 2025 г.). Срок жизни системы был принят равным 15 лет, на основе [224] (20a) и опросам экспертов, проведенным при написании [6]. Кроме того, сделано допущение об отсутствии необходимости замены батареи топливных элементов (эксплуатируемые сегодня системы требуют замены батареи каждые 7–12 лет [6]). Фиксированные расходы: 4 %, основано на [6, 225]. Эффективность: 58 % (2015 г.) [6], эффективность на 2025 г. рассчитана исходя из повышения на 5 % [223] и расчетного повышения на 3 % к 2035 г. Снижение характеристик системы не учитывалось

Технологии электролиза

Выделяют три основные группы технологий электролиза: с использованием щелочных электролизеров (AEL), электролизеров на основе протонообменных мембран (PEMEL) и высокотемпературных твердооксидных электролизеров (HTSOE). AEL и PEMEL работают при температурах T_{op} в диапазоне 50−120 °C, тогда как HTSOE работают при $T_{op} \geq 700$ °C [225, 235]. Более высокая T_{op} позволяет HTSOE обеспечить более высокий *электрический* коэффициент полезного действия, чем в случае AEL и PEMEL: разложение воды происходит, когда температура достигает около $T_{split} = 2\,000$ °C [234]. Чем меньше разница между T_{op} и T_{split}, тем меньше электрической энергии требуется для преодоления сил связи молекулы воды [225, 236].

Как следствие, HTSOE представляют особый интерес при наличии источника тепла вблизи от электролизера. Однако высокая T_{op} также снижает способность HTSOE работать в динамическом режиме [236], который необходим при использовании электроэнергии от непостоянной генерации энергии от ВИЭ. Более того, HTSOE все еще находятся на этапе разработки [235–237], тогда как PEMEL и AEL можно использовать при наличии

электрической энергии мощностью более 3 МВт на одну систему [6]. Исходя из двух этих причин, в настоящей работе рассматриваются только AEL и PEMEL.

$$H_2O_{(l)} \rightarrow H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{(g)};\ \Delta H_R = 285{,}9 \text{ кДж/моль при 1 бар и 25 °C} \qquad (2.12)$$

Теоретический уровень энергии, необходимый для разложения воды (2.12), эквивалентен количеству энергии, высвобождаемой при образовании воды, которая равна энтальпии реакции ΔH_R = 285,9 кДж/моль (1 бар, 25 °C) [238][44].



(a) Щелочной электролизер производства компании Next Hydrogen



(b) Батарея электролизера внутри одной емкости

Рисунок 2.5. Современный щелочной электролизер. Одна емкость содержит электролизер номинальной мощностью 360 кВт, способный вырабатывать 5,4 кг водорода за час. Во второй емкости находятся компрессор и баллон высокого давления.
Источник: Фотография предоставлена компанией Next Hydrogen Corporation, www.nexthydrogen.com

Предел термодинамического КПД этой реакции составляет η_{therm} = 83 % (HTC[45]) [225, 234]. На практике, однако, несовершенство процесса преобразования (работа вспомогательных устройств, например, насосов,

[44] Было опубликовано несколько трудов, посвященных принципам процесса электролиза [225] (гл. 8), [230, 238–240], по этой причине в данном разделе приводится только краткое его описание.
[45] «КПД энергии определяется как энергия произведенного водорода (низшая теплотворная способность, HTC), поделенная на сумму значений энергии, передаваемой сырьем (HTC) при осуществлении процесса, и всей энергии, необходимой для его осуществления» [241].

необходимость осушения и очистки водорода), а также потери энергии при ее преобразовании силовой электроникой являются причиной меньшей эффективности системы[46]: 52–62 % (AEL) и 57–64 % (PEMEL) [6].

Ввиду того, что конструкция AEL совершенствовалась в течение последних 200 лет, а конструкция PEMEL – с ранних 1970-х [243], в будущем ожидается лишь небольшое повышение их эффективности [223]. Однако недавнее исследование, проведенное DOE [223], дает прогноз увеличения эффективности PEMEL на $5\%_{abs}$ за период 2014–2025 гг. Эти данные были учтены в модели.

Основные принципы работы щелочных электролизеров и PEM-электролизеров (на основе труда Штернера и Штадлера [225])

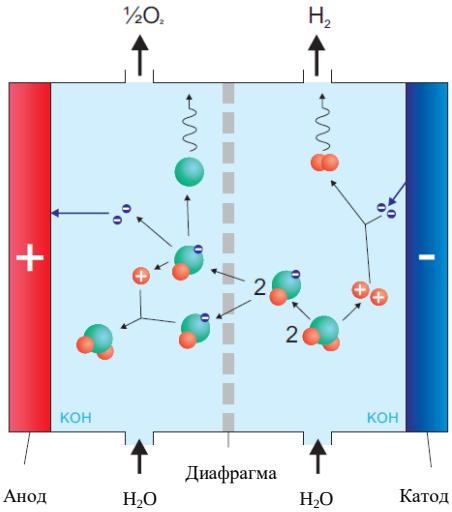
Щелочные электролизеры состоят из двух разделенных диафрагмой электродов, погруженных в жидкий электролит (обычно используется щелочной 20–40%-й раствор гидроксида калия (KOH [225, 236]). При подаче на электроды напряжения на катоде происходит расщепление воды на водород и гидроксид (OH^-) (рис. 2.6a). Водород не способен проникнуть через полупроницаемую диафрагму и выделяется из щелочного раствора в газообразной форме (H_2). Гидроксид проходит через мембрану и образует на аноде воду и кислород[47].

Как можно понять из названия «протонообменная мембрана», перенос зарядов выполняется протонами (H^+), а не молекулами гидроксида, как в случае PEMEL (рис. 2.6b). Если подать на ячейку PEM-электролизера напряжение, на аноде происходит расщепление воды на протоны и кислород. Протоны проходят через мембрану и образуют газообразный водород на катоде. Еще одним принципиальным отличием от AEL является использование

[46] В некоторых литературных источниках приводятся намного более высокие значения эффективности AEL (62–67 % [236], 67–73 % [224]) и PEMEL (65–67 % [236]). Эти значения не были подтверждены в нашем анализе, проведенном на основе данных, предоставленных 16 производителями [6]. Результаты этого анализа [6] согласуются с [242].

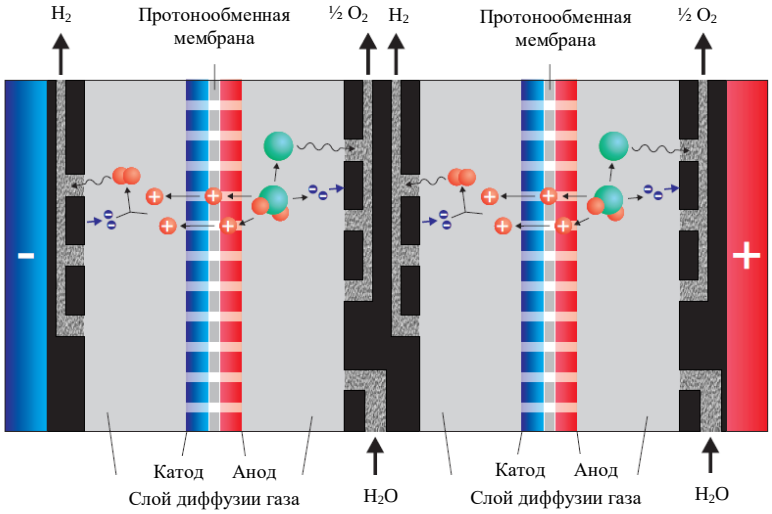
[47] «Электроны расходуются в реакции восстановления на одном электроде и создаются в реакции окисления на другом. Электрод, на котором проходит реакция окисления, называется «анод». Электрод, на котором проходит реакция восстановления, называется «катод» [61].

мембраны из твердотельного полимерного электролита, а не жидкого электролита. Катод, мембрана и анод объединены в единый узел (мембранный обменный узел), стоимость которого составляет около трети стоимости всей батареи[48] [244].



(a) Схематичное представление щелочного электролизера.

Источники: Рисунок создан на основе [227, 235]



(b) Схематичное представление батареи PEM-электролизера, включающей две ячейки – показаны двухфазные пластины.

Источники: Рисунок создан на основе [225, 227, 229, 235]

Анод: $2\,OH^- \rightarrow \frac{1}{2}\,O_{2(g)} + H_2O_{(l)} + 2\,e^-$

Катод: $2\,H_2O_{(l)} + 2\,e^- \rightarrow H_{2(g)} + 2\,OH^-$

Анод: $H_2O_{(l)} \rightarrow \frac{1}{2}\,O_{2(g)} + 2\,H^+ + 2\,e^-$

Катод: $2\,H^+ + 2\,e^- \rightarrow H_{2(g)}$

Всего: $H_2O_{(l)} \rightarrow H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)}$

Рисунок 2.6. Схематичное представление ячеек щелочного (a) и PEM-электролизера (b). Химические реакции на основе [225]; носители заряда отмечены оранжевым цветом

Экономические параметры

В рамках настоящей работы был проведен анализ существующих (на 2014 г.) стандартных электролизеров мегаваттной мощности. Сравнение капиталовложений и издержек, связанных с эксплуатацией и техническим обслуживанием щелочных и PEM электролизеров дало любопытные результаты. Данные, приведенные на рисунке 2.7, указывают на то, что капиталовложения в наиболее конкурентоспособные по цене электролизеры

[48] Сборка элементов.

составляет около 1 800–2 000 долл/кВт-H2, что эквивалентно 1 000–1 100 долл/кВт$_{el}$ на единицу входной мощности (η_{ely} ≈ 58 %). Годовые расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание составили 2–6 %. Ожидается снижение стоимости AEL и PEMEL по мере достижения больших объемов производства [237].

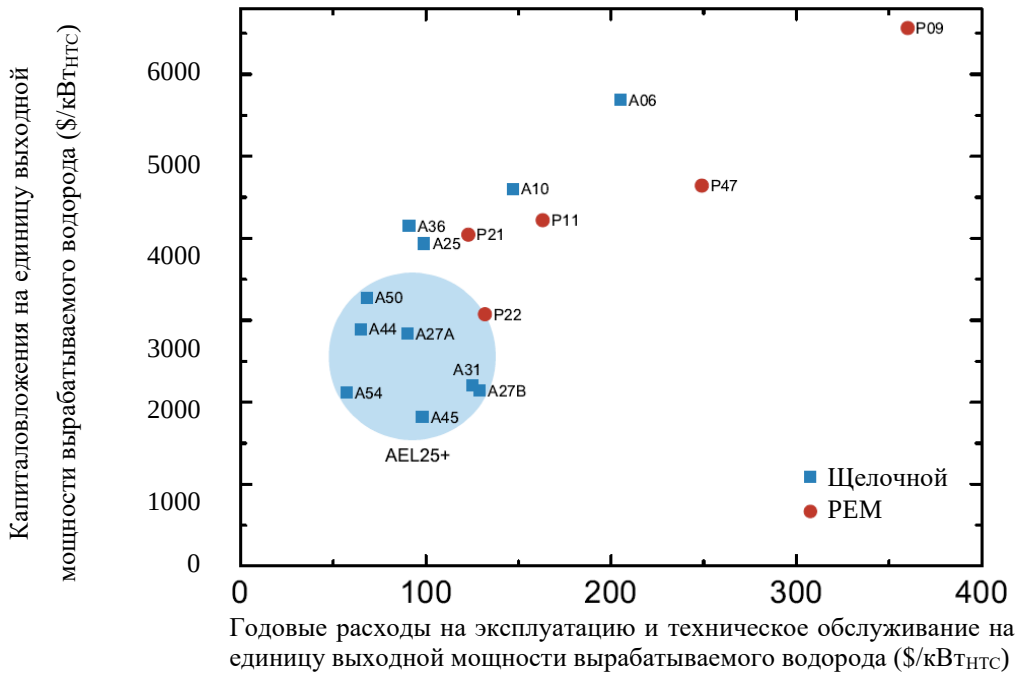


Рисунок 2.7. Капиталовложения и расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание мегаваттных электролизеров. Число, указанное после буквы (A/P для AEL/PEMEL), означает объем выработки водорода в кг/ч. Например, P21 означает электролизер PEMEL производительностью 21 кг/ч. AEL25+ (▭) – это особо экономичный тип электролизеров, выпускаемых различными производителями. Ранее они были описаны автором в [6]

Совместная выработка тепла и водорода

Альтернатива в виде использования рассеиваемого тепла, выделяемого в процессе щелочного и PEM-электролиза, то есть совместная выработка тепла и водорода (СВТВ), в настоящей работе не рассматривалась по следующим причинам: во-первых, доступный уровень температур относительно низок (≈ 50–80 °C), это затрудняет использование тепловой энергии как с технической[49], так и с экономической точки зрения. При работе HTSOE

[49] Для повышения уровня температур может потребоваться задействовать дополнительные процессы.

выделяется тепло при гораздо более высоких температурах, соответственно, СВТВ в этом случае более реалистична. Однако HTSOE имеют тот недостаток, что их гибкость при использовании непостоянно вырабатываемой энергии ВИЭ гораздо более ограничена, чем у AEL или PEMEL. Во-вторых, в этом случае вблизи от электролизера должна наличествовать сеть центрального отопления или теплопоглощающий резервуар, рассчитанный на высокую температурную нагрузку в течение всего года. Ни в одном из рассматриваемых регионов систем в наличии не имеется.

Как показали результаты краткого анализа, проведенного на заводе компании BMW в г. Спартанберге, несмотря на высокие потребности в тепловой энергии (например, в окрасочных цехах), отвод тепла, выделяющегося в процессе электролиза, является наиболее предпочтительным решением с точки зрения стабильности производственного процесса и затрат. С учетом этих обстоятельств возможность коммерчески выгодной утилизации тепловой энергии рассматриваемыми регионами кажется еще менее вероятной. Помимо вышеизложенных соображений, в ответ на запрос производители сообщили, что для реализации СВТВ потребуется разработка нового технического решения, так как все существующие системы спроектированы с учетом работы совместно с охлаждающими контурами.

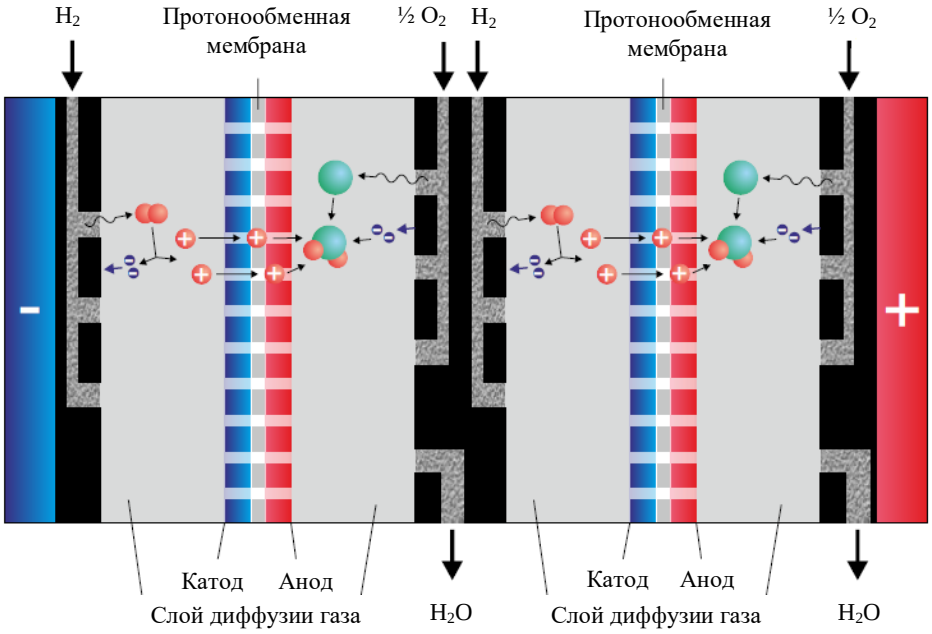
2.3.2. Протонообменный водородный топливный элемент, питаемый водородом

Водородные топливные элементы потребляют водород и кислород (из воздуха) для выработки электроэнергии из энергии образования воды. Наиболее распространенным типом топливных элементов является топливный элемент с протонообменной мембраной (PEMFC) [225], конструкция которого очень схожа с конструкцией PEMEL (см. рис. 2.8 и 2.6b). Для краткости изложенные далее замечания относятся только к основному принципу работы PEMFC и его реализации в имитационной модели. Более глубокое понимание технических моментов можно почерпнуть из большого числа источников: [213, 225, 248–250].

Таблица 2.6. Исходные параметры протонообменного водородного топливного элемента

	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации
	$\beta_{fcell}^{inv}(\$/kW_{H2})$	$\beta_{fcell}^{fix}(\%_{inv})$	$\eta_{fcell}(\%_{LHV})$	L_{fcell} (a)
2015	4000		55	
2025	3000	4	60	15
2035	2000		65	

Источники: расчет издержек для 2015 г. основан на исследовании Аммерманн и др. [245] для топливного элемента мощностью 1 МВт. Авторы этого исследования также приводят прогнозы по дальнейшему снижению затрат. Возможности в этом плане разделены на три аспекта: запуск производства, стандартизация и перевод в промышленное производство. Для первого этапа авторы отмечают следующее: «в среднем на предприятиях отрасли ожидается общее снижение стоимости систем более чем на 25 % (без учета надбавки производителя и торговой наценки, но включая стоимость монтажа)». На втором и третьем этапах ожидаемое снижение стоимости должно составить, соответственно, 23 и 20 %. На основании данных этого источника снижение стоимости по сравнению с 2015 г. было принято на уровне 25 и 50 % (для 2025 и 2035 гг.). Срок службы был оценен в 15 лет (на основании [245] (11–19a). Ухудшение характеристик батарей и их замена не рассматривались. Эффективность на 2015 г. основана на: [245] (≈ 55 %), [246] эффективность системы топливных элементов на водороде и воздухе 44–57 % НТС; [247] 40–60 % НТС. Дальнейшее повышение эффективности было принято равным 5 % за десять лет (на основе [245])



Анод: $H_{2(g)} \rightarrow 2H^+ + 2\,e^-$ Катод: $\frac{1}{2}O_{2(g)} + 2H^+ + 2\,e^- \rightarrow H_2O$

Всего: $H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(l)}$

Рисунок 2.8. Схематическое представление топливного элемента с протонообменной мембраной

Источники: Рисунок создан на основе [227, 235–252]

Основной принцип работы PEMFC

На рисунке 2.8 показан основной принцип работы PEMFC. По сути, это реакция, обратная разложению воды в PEM-электролизере (описана в предыдущем подразделе 2.3.1) [213]. На аноде водород (H_2) окисляется до двух протонов ($2H^+$). Они проходят через мембранный обменный узел к катоду, где вступают в реакцию с кислородом (O_2) с образованием воды (H_2O).

Совместно электролизер (электроэнергия → H_2), системы хранения H_2 и топливный элемент (H_2 → электроэнергия) составляют систему хранения электрической энергии, аналогичную аккумуляторной батарее. Однако по сравнению с последней высокая энергоемкость водорода влечет явные преимущества с точки зрения рентабельности масштабных мощностей хранения электроэнергии: одна автоцистерна, заполненная 4 тоннами жидкого водорода, содержит около 133 МВт/ч$_{H2\text{-}HTC}$, эту энергию можно преобразовать в 73 МВТ/ч$_{el}$ с помощью топливного элемента с эффективностью η_{PEMFC} = 55 %. Для обеспечения хранения такого же количества энергии потребуется около 290 тонн литий-ионных батарей (емкостью 0,25 кВт/ч/кг [121]).

Реализация в имитационной модели

Для целей моделирования было принято, что используется центральный водородный топливный элемент типа PEM, находящийся вблизи от электролизера и хранилища водорода. Во время работы над этим исследованием были также рассмотрены питаемые природным газом топливные элементы, обеспечивающие совместную выработку тепловой и электроэнергии [7]. Однако было выяснено, что эти системы, по сути, являются альтернативой электрораспределительной сети и, как таковые, не позволяют лучше оценить влияние электрических средств обеспечения мобильности на энергосистему с увеличивающейся долей непостоянных ВИЭ. По этой причине объем настоящей работы был ограничен рассмотрением топливных элементов, работающих на водороде. Возможности одновременной выработки тепла не рассматривались по тем же причинам, что совместная выработка тепла и

водорода. Для того чтобы учесть этот недостаток, были приняты оптимистические значения электрического КПД топливных элементов типа PEM (средний КПД ≥ 55 %)[50].

2.3.3. Power2Gas (P2G)

В целом подход Power2Gas («энергия в газ») (P2G) описывает идею использовать избыточную энергию от непостоянных возобновляемых источников для выработки газообразного энергоносителя того или иного вида (например, водорода или метана) и его распределения посредством общей сети подачи газа.

Таблица 2.7. Исходные параметры для процесса Power2Gas

	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации
	$\beta_{p2g}^{inv}(\$/kWh)$	$\beta_{p2g}^{fix}(\%_{inv})$	$\eta_{p2g}(\%_{LHV})$	L_{p2g} (a)
2015	260			
2025	130	4	99	15
2035	8			

Источники: расчет издержек для 2015 г. основан на исследовании Регетт и др. [3], в котором использованы исходные данные, опубликованные Урбан [254]. Расчеты расходов на 2025 и 2035 гг. основаны на данных об ожидаемом снижении издержек (изложены в [255, 256]), проистекающим из внедрения технологии.

Процесс P2G может включать один или два этапа в зависимости от того, является ли конечным продуктом, используемым в сети газоснабжения, водород или метан. В любом случае первым этапом этого процесса является выработка водорода. На возможном втором этапе водород вместе с углекислым газом (CO_2) может служить для производства метана (CH_4). Выгодой двухэтапного процесса является полная совместимость продукта с инфраструктурой распределения природного газа, так как последний в основном состоит из метана. Недостатком дополнительной реакции является

[50] Питаемые природным газом топливные элементы в составе систем ТЭС, имеют гораздо более низкий показатель электрического КПД (30–40 % [253], 27–44 % [246]).

снижение эффективности процесса и необходимости наличия поблизости источника углекислого газа высокого давления.

В настоящей работе процесс P2G предполагает использование непосредственно водорода, без последующей выработки метана. Соответственно, было исследовано влияние использования водорода на: 1) существующие приборы, например, на системы газового отопления; 2) существующие сети распределения природного газа. Исследование было основано на обзоре литературных источников информации.

Влияние использования водорода на существующие приборы и устройства

Более низкая объемная энергоемкость водорода (HHV_{H2} = 3,5 кВт/м^3) по сравнению с таковой у природного газа (HHV_{NG} = 11,2 кВт/м^3 для низкокалорийного газа) ведет к изменению потребительских качеств газа и режима его горения [257]. Это влияние количественно выражается с помощью коэффициента Уобба (W_{HHV} или W_{HTC}), определяющего взаимозаменяемость газов, который может быть рассчитан по уравнению (2.13) с учетом более высокой теплотворной способности (HHV), плотности газа и плотности сухого воздуха ρ_{air}. Систему сжигания газа можно перевести с одного газа на другой газ, имеющий такой же коэффициент Уобба, без необходимости технической корректировки [258].

$$W_{HHW} = \frac{HHV}{\sqrt{\frac{\rho}{\rho_{air}}}} \qquad (2.13)$$

Введение 20 % водорода в сеть подачи природного газа приведет к снижению объемной плотности примерно на 15 % по сравнению с природным газом, но при этом существенно более низкая энергоемкость водорода (ρ_{H2} = 0,09 кг/м^3 > $\rho_{NG\text{-}L}$ = 0,79 кг/м^3) уменьшает снижение коэффициента Уобба до всего лишь 5 % [257]. При этом все равно потребуется внесение изменений

в такие промышленные процессы, как работа газовых турбин, плавка стекла, металлургические и химические процессы. Характеристики потребительских систем газового отопления от внедрения процесса P2G не ухудшатся, даже с учетом снижения выхода мощности вследствие более низкой объемной энергоемкости смеси газов [258–261].

Влияние использования водорода на сеть распределения природного газа

Энергоемкость также оказывает влияние на транспортную эффективность сети распределения природного газа, так как более низкая плотность ведет к увеличению энергии сжатия на единицу доставляемой энергии[51]. Хотя это в основном экономический аспект, водород также может вызывать охрупчивание трубопроводов и емкостей-хранилищ, что может приводить к развитию трещин и возникновению утечек [263]. В целом концентрация на уровне 10–15 % не считается критичной, при этом в некоторых случаях (например, для автоцистерн перевозки газов, на заправочных станциях) допускается концентрация водорода не более чем до 2 % процентов (в Германии, DIN 51624) [259, 260].

Обобщая: подход P2G представляет собой интересный способ хранения излишков энергии, генерируемой из непостоянных возобновляемых источников, с использованием систем распределения природного газа. Было определено, что использование водорода не является критичным для бытовых целей отопления газом. Дополнительная информация о подходе P2G изложена в [259, 263, 264] (на немецком языке) и [261] (на английском языке).

Для целей моделирования эффективность системы P2G была оценена в 99 % (с учетом энергии, затрачиваемой на компрессию подаваемого водорода и более низкой транспортной эффективности). В дополнение к процессу P2G сеть подачи газа в регионах была реализована в имитационной модели в виде

[51] Потребление энергии, доставляемой по трубопроводам и распределительным сетям, в США составляет 3 % от общего потребления газа [262]. Авторы [259] рассчитали, что повышенное давление, необходимое для доставки равного количества энергии при использовании насыщенного водородом (концентрация 10 %) природного газа, приведет к снижению на расстоянии 500 км транспортной эффективности на 1 %.

существующей емкости хранения «сеть подачи газа». Это фактически обеспечивает возможность задействовать систему P2G, то есть подавать водород в сеть газоснабжения в любой момент времени. Без этого условия система P2G могла бы функционировать только в моменты потребления природного газа, т. е. во время использования газовых топок, что привело бы к снижению гибкости системы P2G. Расчетная производительность сети газоснабжения составляет 100 МВт/ч (≈ 9 000 $м^3$) для меньших регионов PUT и LAH, и 400 МВт/ч (≈ 36 000 $м^3$) в более крупных регионах NEU и LIN. Еще одно примечание: количество водорода в сети питания природного газа или сети газораспределения во время моделирования не контролируется. По этой причине подача водорода не ограничена, и условия для функционирования системы P2G более выгодные, чем в реальности.

3. Хранение энергии

Для обеспечения потребности $D(t)$ при пиковой нагрузке $D^{peak} = \max D(t)$ существуют две основных возможности: первый вариант состоит в развертывании такой же или большей рабочей мощности процессов P_p по отношению к пиковой нагрузке ($P_p \geq D^{peak}$), что ведет к отношению $P_p \geq D(t)\ \forall\ t$. Это – обычное решение для профилей с равномерной нагрузкой, имеющих низкие вариации между D^{peak} и средней нагрузкой $D^{avg} = 1/t \sum_t D(t)$.

В случае менее упорядоченной структуры нагрузок проявляется недоиспользование мощностей, установленных для обеспечения соответствия пиковой нагрузке. По этой причине обычно используется второй вариант – комбинация процесса и мощности, доставляемой из хранилища. Мощность, доставляемая из хранилища P_s, соответственно, позволяет устанавливать меньше рабочей мощности процессов $P_p < D^{peak}$, так как в этом случае для покрытия пиковых нагрузок $P_{sys} \geq D(t)$ можно использовать совокупную мощность системы $P_{sys} = P_p + P_s$. Таким образом, системы хранения эффективно уменьшают зависимость рабочей мощности процессов Pp от спроса $D(t)$, так как появляется возможность генерации энергии и ее хранения в периоды низкого спроса и извлечения из хранилищ в то время, когда спрос высок. В имитационной модели реализованы три различные вида систем хранения энергии: хранение тепловой энергии (подраздел 3.1), хранение электрической энергии (подраздел 3.2) и хранение водорода (подраздел 3.3). Последний вид хранения может служить двойной цели: во-первых, в качестве буферного хранилища водорода для заправки FCEV, позволяющего осуществлять выработку водорода во время непостоянной генерации энергии от ВИЭ и последующей заправки в другое время. Во-вторых, в связке с топливным элементом (подраздел 2.3.2) – в качестве хранилища электроэнергии, которое фактически превращает всю цепочку выработки и доставки водорода, включающую электролизер (электроэнергия → H_2), хранилище водорода и топливный элемент (H_2 → электроэнергия) в «водородную батарею».

3.1. Аккумулирование тепла

В рассматриваемых регионах системы аккумулирования тепла используются как дополнение к системам выработки тепловой энергии (подраздел 2.2). Самым обычным типом систем, используемых для этой цели, являются системы хранения горячей воды. Эти так называемые «переменные»[52] системы хранения служат для запасания энергии путем повышения температуры воды и высвобождения энергии путем ее снижения.

Таблица 3.1. Исходные параметры систем хранения горячей воды

Горячая вода	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации
Способ хранения	$\beta_{\mathbf{hot}}^{\mathbf{inv}}(\$/\mathrm{kWh})$	$\beta_{\mathbf{hot}}^{\mathbf{fix}}(\%_{\mathbf{inv}})$	$\eta_{\mathbf{hot}}(\%_{\mathbf{LHV}})$	L_{hot} (a)
2015 / 25 / 35	150	2	85	20

Источники: расчет расходов на 2015 г. основан на [265–267]. Эти виды систем хранения горячей воды использовались в течение десятков лет, поэтому в рамках моделируемого сценария дальнейшее снижение расходов не предусматривается

Данных, позволяющих провести подробный анализ стоимости систем хранения воды для жилых домов, получить не удалось. По этой причине необходимые исходные данные были определены путем онлайн-анализа систем, доступных в настоящее время (например, Vaillant Unistor® (150 л), Buderus SU-200® (200 л), Buderus Logalux® (160 л)), а также отдельных систем хранения, которые могут эксплуатироваться совместно с тепловыми насосами [265–267]). На основе этих данных была определена величина расходов на установленную объемную мощность $\beta_{\mathbf{hot}}^{\mathbf{inv,vol}}$ хранилища, равная 6 долл/л.

После этого была рассчитана стоимость на единицу емкости хранилища $\beta_{\mathbf{hot}}^{\mathbf{inv}}$ по уравнениям (3.1) и (3.2). Необходимые исходные параметры – плотность $\rho \approx 1$ кг/л и удельная теплоемкость $C_p =$ 4,18 кДж/(кг · K) ≈ 1,16 Вт/ч/(л · K) воды при расчетном рабочем диапазоне температур $\Delta T = 35\ °C - 70\ °C = 35$ K.

[52] Эти системы аккумулирования тепла основаны на разнице температур.

$$E_{hot}(1\ l) = 1\ l \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \approx 1.16 \frac{Wh}{l \cdot K} \cdot 35\ K = 40.6\ Wh/l \quad (3.1)$$

$$\beta_{hot}^{inv} = \beta_{hot}^{inv,vol} = \frac{6\ \$/l}{40.6\ Wh/l} = 150\ \$/kWh \quad (3.2)$$

3.2. Хранение электрической энергии

В имитационной модели реализованы два вида хранилищ электрической энергии: система Vehicle2Grid (V2G), которая доступна только при варианте *B*, и литий-ионная аккумуляторная батарея, которую можно установить при любом из расчетных вариантов (варианты *B*, *F* и *I*, см. подраздел 2.3).

3.2.1. Vehicle2Grid (V2G)

В настоящее время 95 % времени автомобили проводят на стоянке [268, 269]. Если ТС ДВС в это время бесполезны, BEV могут приносить пользу.

Таблица 3.2. Исходные параметры для системы Vehicle2Grid

Транспортное средство	var-cost	Доступность	Эффективность	
Способ хранения	β_{v2g}^{inv} ($/kWh)	%парка	η_{v2g} (%$_{LHV}$)	L_{v2g} (a)
2015	0,43		72	
2025	0,13	15	77	
2035	0,09		81	

Источники: переменные расходы на компенсацию дополнительного износа аккумуляторных батарей были рассчитаны по данным, полученным в ходе обсуждений с экспертами из академической среды и представителями группы компаний BMW. Эффективность системы V2G была рассчитана по квадрату эффективности зарядки (таблица 1.4). Доступная емкость рассчитана с учетом емкости батарей: 20, 45 и 60 кВТ/ч на ТС (2015 / 2025 / 2035 гг.) и средней доступности на уровне 15 %. Это означает, что парк в составе 1 000 BEV в 2035 г. обеспечивает для региона хранилище электроэнергии емкостью в 9 МВт/ч с переменными затратами, равными 9 $-ct на 1 кВт/ч (+ потери энергии с учетом эффективности системы V2G)

Так как стоимость аккумуляторной батареи составляет б*о*льшую часть стоимости транспортного средства, существует возможность ее полезного использования в случае, если ТС предоставляет свои мощности хранения

энергии для сети энергоснабжения (система Vehicle2Grid, V2G). Однако ввиду того, что аккумуляторные батареи этих ТС предназначены для обеспечения перевозок, увеличенное количество зарядок – разрядок в системе V2G может привести к преждевременному ухудшению их характеристик и более короткому сроку службы.

В настоящее время отсутствует консенсус по поводу того, мешает ли использование системы V2G выполнению аккумуляторными батареями их основной (транспортной) функции и насколько сильно, так как износ от включения в систему V2G зависит от различных факторов, например, от химического состава батарей, температуры внешней среды и токов зарядки (разрядки).

Маронгю и др. [270] отмечают: «ограничение работоспособности самых маломощных аккумуляторных батарей, эксплуатируемых в жестких условиях в течение 1 года, составило до 14,63 % [вследствие включения в систему V2G]». Авторы также утверждают, что в местах с высокими температурами внешней среды повышенное старение батарей может превышать влияние увеличенного количества циклов зарядки – разрядки при использовании V2G. Миллнер [271] утверждает, что для подзаряжаемых гибридных электрических транспортных средств (PHEV) «работа в системе “транспортные средства в сеть” на уровне нескольких циклов зарядки – разрядки в месяц будет оказывать пренебрежимо малое влияние по сравнению с влиянием, оказываемым собственно эксплуатацией ТС», при условии, что «не допускается очень большая глубина разряда (разрядка > 60 %), слишком высокие температуры эксплуатации (> 35 °C) или уровень заряда (> 60 %)».

Петерсон и др. [272] отмечают, что «использование аккумуляторной батареи типа PHEV в системе V2G ведет к потере емкости на единицу энергии примерно в половину меньшей, чем потери, связанные с более быстрыми циклами зарядки – разрядки при эксплуатации ТС. При этом глубина разрядки в любом случае значения не имела, кроме как в качестве меры используемой энергии».

Более точное понимание этого аспекта будет получено по мере появления большего количества экспериментальных данных. С целью учета возможности снижения срока службы аккумуляторных батарей в имитационную модель был введен показатель переменных затрат на единицу хранимой энергии. Общая емкость была рассчитана на основе ожидаемой средней емкости ТС (2015 / 2025 / 2035 гг.: 20, 45 и 60 кВт/ч), а также средней доступности[53] ТС на уровне 15 %, основанной на результатах проекта Gesteuertes Laden 3.0, осуществленного в Германии [273, 274].

3.2.2. Домашние батарейные системы

За последнюю пару лет количество доступных домашних батарейных систем хранения энергии неуклонно увеличивалось. В основном это связано с прямой интеграцией, осуществляемой производителями аккумуляторных батарей, например, Samsung® [281], Panasonic® [282] и Saft® [283], но также и с выходом на этот рынок производителей автомобилей (например, Daimler® [284], Tesla Motors® [275], BMW® [285]), которые стремятся к формированию синергии своих производств электрических транспортных средств.

Таблица 3.3. Исходные параметры для системы хранения энергии, основанной на литий-ионных батареях

Литий-ионная батарея	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации
Способ хранения	$\beta_{batt}^{inv}(\$/kWh)$	$\beta_{batt}^{inv}(\%_{inv})$	$\eta_{batt}(\%)$	L_{batt} (a)
2015	1200			
2025	750	2	89	15
2035	450			

Источники: стоимость на 2015 г. основана на [275] – Tesla Powerwall® (1 200 $/кВт/ч, 2014 г.) и [276] (1 400 $/кВт/ч, 2014 г.). Прогнозные значения стоимости были рассчитаны с учетом ожидаемого снижения стоимости литий-ионных батарей [18] и предположения о снижении стоимости с учетом монтажа, основанного на [276] (-30 % к 2025 г., -60 % к 2035 г.). Срок службы был рассчитан на основе [277] (20a). Фиксированные расходы в размере 2 % основаны на [278, 279]. Эффективность была оценена в 89 %, на основе [280] (89 %), [275] (85–96 %) и [279] (89–92 %)

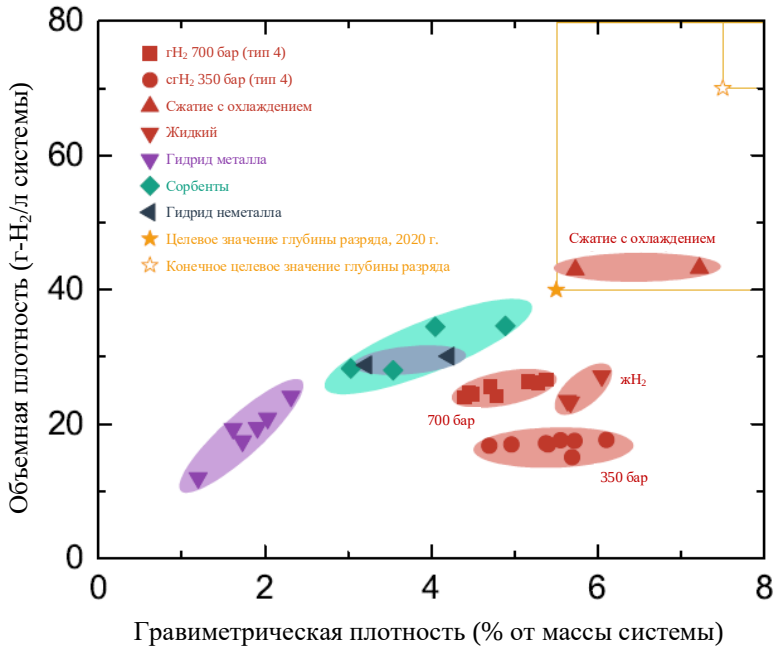
[53] Которая, опять-таки, зависит от доступности зарядных устройств (см. подраздел 1.2) и, в частности, от уровня заряда после прибытия ТС в место назначения.

Большинство из систем хранения имеют емкость в районе от единиц до (немногих) десятков киловатт-часов [286] и, соответственно, считаются системами краткосрочного хранения энергии. Обычные области применения таких систем – сглаживание нагрузки, в качестве резервного источника энергоснабжения или для увеличения собственного потребления солнечной энергии. В Германии за период с 2013 по 2015 г. было установлено более 12 000 таких систем [287].

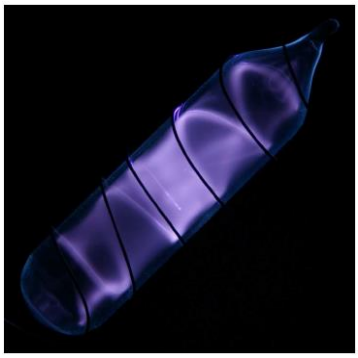
Самыми распространенными технологиями, используемыми при производстве аккумуляторных батарей, являются свинцово-кислотная (PbA) и литий-ионная (ЛИБ). PbA – самая старая технология изготовления повторно заряжаемых аккумуляторных батарей, она отличается низкой стоимостью и хорошей эффективностью (70–90 %), но при этом также – малым сроком службы (500–2 000 циклов) и малой (50–70 %) глубиной разрядки [279, 288–290]. Литий-ионные батареи, напротив, имеют эффективность на уровне 85–90 %, глубину разрядки в 80 % и срок службы в диапазоне 1 000–5 000 циклов [275, 279, 289, 290].

Кислотно-свинцовая технология достигла высокого уровня зрелости, помимо прочего, она применяется в сотнях миллионов низковольтных аккумуляторных батарей, установленных в традиционных автомобилях. Соответственно, ожидаемое дальнейшее снижение стоимости этого вида батарей будет небольшим [279]. И наоборот, ожидается, что стоимость с учетом монтажа ЛИБ-батарей (в настоящее время она составляет 1 200 $/кВт/ч) в течение будущих лет будет существенно снижаться [18, 279] в результате увеличения объемов производства для целей использования в ЭТС и в качестве стационарных систем хранения энергии.

Аккумуляторные батареи, реализованные в имитационной модели, основаны на текущих системах ЛИБ (таблица 3.3). Аккумуляторные батареи PbA далее не рассматривались ввиду того, что батареи типа ЛИБ имеют лучшие технические характеристики и больший потенциал снижения стоимости.



(a) Технологии хранения водорода



(b) Ионизированный газообразный водород

Рисунок 3.1. (a) Обзор технологий хранения водорода (не исчерпывающий) (b) Ионизированный газообразный водород в стеклянном сосуде

Источники: (a) основано на [291–294]; (b) фотография предоставлена www.images-of-elements.com [295]

3.3. Хранение водорода

Водород можно хранить в его природной форме (H_2) в системах физического хранения или в химических системах хранения. В транспортных средствах на сегодняшний день подтверждено [296] использование только систем физического хранения, так как эти системы имеют наибольшую (гравиметрическую) энергоемкость, как показано на рисунке 3.1a. Эти системы хранения показали себя как надежное технологическое решение не только для транспортной области[54], но также для решения задач стационарного хранения энергии, например, для заправки работающих от топливных элементов вилочных погрузчиков на заводах BMW® в Лейпциге (Германия) [298] и Спартанберге (США) [299]. Несмотря на то что различные другие

[54] Хранение водорода в газообразном виде является, вероятно, старейшей технологией, используемой в транспортных средствах, если вспомнить Жака и Роберта Шарль, которые в 1783 г. изобрели водородный воздушный шар [297].

технологические решения (например, гибридные технологии [300, 301], решения на основе сорбентов [302–304]) перспективны в качестве стационарных хранилищ водорода, ни одна из них пока не достигла уровня такой же технической и (или) экономической зрелости, как системы хранения, сжатого газообразного (сгH_2) и сжиженного (жH_2) водорода. По этой причине настоящее исследование ограничивается рассмотрением именно этих (коммерчески реализуемых) технологий. Обзорные сведения всей цепочки выработки и поставки водорода представлены на рисунке 1.1.

Выбор между системами хранения сгH_2 и жH_2 определяется требованиями к энергоемкости и эффективности в соответствующих областях применения: в случаях, когда важнее энергоемкость, например, при транспортировке больших объемов энергии[55], выбор падает на системы жH_2. Однако учитывая, что при сжижении водорода потребляется около трети запасенной энергии, сгH_2 является более энергоэффективной альтернативой в случаях, когда необходимо обеспечить хранение меньших количеств водорода (т. е. при краткосрочном хранении).

Далее изложены общие сведения о технологиях, используемых в системах сгH_2 (резервуары и компрессоры) и системах жH_2 (сжижитель, резервуар, испаритель, крионасос), т. е. на заправочных станциях.

3.3.1. Хранение сжатого газообразного водорода

Для FCEV, оснащенных бортовым хранилищем под давление в 700 бар, требуется давление при заправке до 880 бар[56] [310] для того, чтобы обеспечить непрерывный поток водорода и завершение заправки в течение 2–5 минут.

Далее описаны две конфигурации систем хранения газообразного водорода, позволяющие достичь требуемых высоких давлений [311]. Затем изложены результаты изучения энергии сжатия, а также кратко поясняется необходимость в предварительном охлаждении перед началом процесса

[55] Согласно данным Шварца [305], в специальной автоцистерне можно перевезти 4 500 кг жидкого водорода, по сравнению с 300 кг газообразного водорода, перевозимыми в прицепе-баллоне схожей массы.
[56] Для сравнения: давление в Марианской впадине (около 11 км ниже уровня моря) составляет около 1 070 бар.

заправки. В последнем параграфе раздела описана двухэтапная система хранения с некоторыми изменениями, принятая для имитационной модели.

Таблица 3.4. Исходные параметры
для емкостей-хранилищ сгH_2 и компрессоров

сгH_2 под давлением 350 бар	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации
Способ хранения	$\beta^{inv}_{ghydl}(\$/kg_{H_2})$	$\beta^{inv}_{ghydl}(\%_{inv})$	$\eta_{ghydl}(\%)$	L_{ghydl} (a)
2015	1000			
2025	900	4	100	15
2035	800			
сгH_2 под давлением 880 бар	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации
Способ хранения	$\beta^{inv}_{ghydh}(\$/kg_{H_2})$	$\beta^{inv}_{ghydh}(\%_{inv})$	$\eta_{ghydh}(\%)$	L_{ghydh} (a)
2015	1800			
2025	1620	4	100	15
2035	1440			
Источники: Расчет расходов на 2015 г. основан на [306–308]. В [308] приводится прогноз снижения цен в диапазоне от 0 % (пессимистичный) до 25 % (оптимистичный) на рынке емкостей большого объема в период с 2014 по 2020 г. Ввиду того, что другие прогнозные данные недоступны, для обоих уровней давления были приняты консервативные значения в 10 % (на 2025 г.) и 20 % (2035 г.) по сравнению с 2015 г.				
350 бар	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации
компрессора	$\beta^{inv}_{compl}(\$/kg_{H_2})$	$\beta^{inv}_{compl}(\%_{inv})$	$\eta_{compl}(\%)$	L_{compl} (a)
2015	280		88,8	
2025	210	4	89,3	15
2035	140		89,8	
880 бар	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации
компрессора	$\beta^{inv}_{comph}(\$/kg_{H_2})$	$\beta^{inv}_{comph}(\%_{inv})$	$\eta_{comph}(\%)$	L_{comph} (a)
2015	280		94,9	
2025	210	4	95,1	15
2035	140		95,4	
Источники: расчеты стоимости на 2015 г. основаны на [308] для компрессорной системы (20–950 бар). Стоимость была равномерно распределена для высокого и низкого уровней давления. В источнике [308] также приводится оценка снижения стоимости на 25 % (базисная) и 50 % (оптимистический сценарий) на 2025 и 2035 гг. Фиксированные расходы рассчитаны на основе опыта работы заводов BMW и источника [309]. Расчетное снижение потребления энергии составляет 5 % за десять лет, с 6 кВт/ч/кг-H_2 в 2015 г. до 5,7 кВт/ч/кг-H_2 и 5,4 кВт/ч/кг-H_2 соответственно				

Конфигурации систем хранения газообразного водорода

Первая конфигурация включает емкость, содержащую сгH_2 под низким давлением и «бустерный» компрессорный узел[57], обеспечивающий сжатие водорода непосредственно в процессе заправки транспортного средства. Такая система позволяет использовать более дешевые хранилища низкого давления, однако ее пропускная способность ограничена производительностью компрессорного узла. Следует отметить, что такая система не обладает избыточностью на случай отказа компрессора[58].

Альтернативная конфигурация предполагает использование компрессоров меньшей производительности для наполнения хранилищ сгH_2 высокого давления до момента фактической заправки транспортного средства. В этом случае появляется возможность «отвязать» пропускную способность хранилища от производительности компрессора и добиться большей избыточности системы, однако обеспечить это становится возможно за счет более дорогостоящих емкостей-хранилищ.

Наиболее распространенной конфигурацией систем[59], используемых на заправочных станциях, является один из вариантов систем второго типа: несколько емкостей с разными значениями давления объединяют в так называемое «каскадное хранилище», которое позволяет извлечь выгоду из меньших расходов на хранение и более высокой пропускной способности. Стандартное каскадное хранилище включает емкости[60] под давлением около 200, 500 и 800–900 бар [308]. Заправка FCEV начинается с подачи газа из хранилища с наименьшим давлением. Когда массовый расход падает ниже заданного значения, система переключается на емкости с более высоким давлением. Таким образом, давление заправки повышается, пока резервуар ТС не будет полностью заправлен [313].

---

[57] Требуемая выходная мощность для обеспечения возможности заправки в течение 3–5 мин (2 кг-H_2/мин) одного ТС: ≈ 120 кг-H_2/ч.

[58] «Среди поломок, связанных с водородными системами, неисправности компрессоров остаются самой частой причиной внепланового технического обслуживания с точки зрения количества инцидентов и трудозатрат» [312].

[59] В своей работе [311] Ротюзен подробно излагает различные конфигурации заправочных станций.

[60] Хранилище представляет собой несколько емкостей, работающих с одинаковым давлением.

Энергия сжатия

Энергоэффективность компрессии водорода зависит от термодинамических процессов, лежащих в ее основе. При идеальном изотермическом сжатии для компрессии 1 кг водорода от атмосферного давления до давления в 350 бар требуется только 2,1 кВт/ч, что эквивалентно 6 % энергосодержания (низшая теплотворная способность, НТС) [310]. Энергия сжатия зависит не от конечного давления p_f как такового, но от его отношения к начальному давлению p_i (3.3).

$$W = p_i \cdot V_i \cdot \ln\left(\frac{p_f}{p_i}\right) \text{ при } V_i(H_2) = 11{,}1 \text{ м}^3;\ p_i(H_2) = 1{,}01 \text{ бар} \qquad (3.3)$$

Таким образом, для дальнейшего сжатия до 880 бар потребуется лишь немногим больше энергии (2,5 кВт/ч/кг или 7,5%$_{НТС}$) [310, 314, 315]. Подробное объяснение термодинамических процессов приводится в [316, 317] (на английском языке) и [224] (на немецком языке, стр. 177); наглядно процессы сжатия и заправки водородом показаны в видеоролике [318], созданном компанией Linde AG.

Более точную оценку реальных потребностей в энергии при сжатии водорода можно получить из уравнения (3.4) для изоэнтропийного[61] сжатия [224]. В этом уравнении κ описывает показатель адиабаты $\kappa = c_p/c_V$ удельной теплоемкости c_p (при постоянном давлении) и c_V (при постоянном объеме).

$$W = \frac{p_i \cdot V_i \cdot \left(\left[\frac{p_f}{p_i}^{\frac{k-1}{k}}\right] - 1\right)}{k-1} \text{ при } \kappa(H_2) = 1.41 \text{ при } 20\ ^\circ C \qquad (3.4)$$

Для определения общей эффективности, помимо энергии сжатия, необходимо учесть также техническую эффективность η компрессора, так как в уравнениях (3.3) и (3.4) сжатие рассчитано без учета трения. С учетом вышеизложенного фактические значения потребления энергии для сжатия

[61] Адиабатический и обратный процессы.

водорода существенно выше 2,5 кВт/ч, рассчитанных для изотермического сжатия. Кроме того, данные[62] подвержены значительным вариациям: 1,7–6,4 кВт/ч/кг [310]. Реальные данные, полученные на заводе BMW в г. Спартанберг (США), позволяют утверждать, что на текущем уровне развития технологий для сжатия 1 кг водорода до давления около 400 бар требуется примерно 5,5 кВт/ч электроэнергии (17 % НТС).

Предварительное охлаждение

В момент прибытия транспортного средства на заправочную станцию давление в его резервуаре всегда ниже давления водорода в хранилищах станции. Соответственно, на впускном отверстии ТС будет иметь место падение давления. Это ведет к повышению температуры за счет эффекта Джоуля – Томсона[63] [317]. Кроме того, происходит сжатие водорода в резервуаре ТС до достижения конечного давления в 700 бар, что ведет к еще большему повышению температуры [317].

Во время быстрой заправки FCEV не допускается превышения температуры в резервуаре ТС значения 85 °C [319]. Это означает, что для заправки FCEV за 2–5 минут от системы хранения сгH_2 необходимо обеспечить предварительное охлаждение газа до −40 °C, что требует дополнительно 0,5 кВт/ч/кг [320].

Двухэтапная система, принятая в имитационной модели

В имитационной модели была реализована упрощенная каскадная система с двумя уровнями давления (350 и 880 бар). После выработки водорода электролизером под давлением около 20 бар[64] газ поступает на первый компрессор, который сжимает его до давления 350 бар и подает в первое хранилище (альтернативой этому является использование подхода «энергия

[62] Данные об энергопотреблении компрессоров, опубликованные Департаментом энергетики США. Конкретные величины отличались в 10 и более раз [308, 312].
[63]Температура водорода повышается при снижении давления ввиду отрицательного коэффициента Джоуля – Томсона в соответствующем диапазоне температур [317].
[64] Выходное давление современных электролизеров составляет от 1 до 35 бар [6].

в газ», см. п. 2.3.3). Второй компрессор служит для доведения давления во втором хранилище (используемом для заправки FCEV) до 880 бар. На основе результатов измерений, приведенных выше, общая энергия сжатия всего процесса (с 20 до 880 бар) была рассчитана равной 6 кВт/ч/кг (18 % НТС). В соответствии с кривой изоэнтропического сжатия (рис. 3.2) 70 процентов энергии сжатия приходится на первый этап (20–350 бар) и 30 процентов – на второй (350–880 бар).

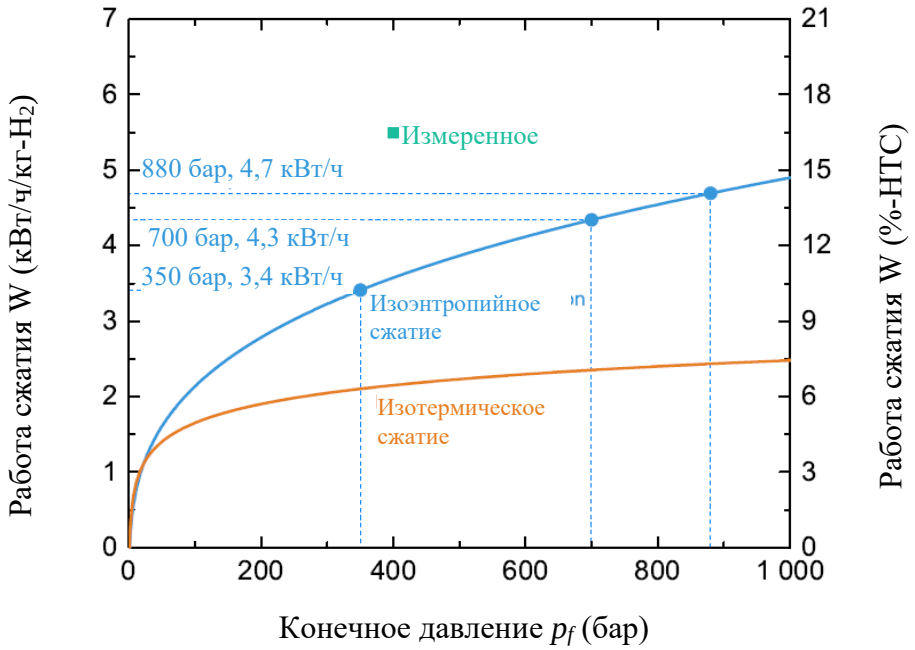


Рисунок 3.2. Работа, необходимая для сжатия 1 кг водорода, по уравнению (3.4) [224]

3.3.2. Хранение жидкого водорода

Впервые водород был переведен в жидкую форму Джеймсом Дюаром в 1898 г. [317, 321], всего за три года до момента, когда Карл фон Линде изобрел свою Gasverflüssigungs-Maschine[65] [322]. Прошло еще примерно пятьдесят лет, пока не встала необходимость сжижения водорода в б*о*льших масштабах [321] для создания атомного оружия во время Второй мировой войны. Впоследствии жидкий водород использовался в качестве ракетного топлива для «космической гонки» во времена холодной войны[66].

[65] «Машина для сжижения газов».
[66] Тиммерхаус опубликовал всесторонний обзор истории развития техники низких температур в [323].

Для осуществления перехода водорода в жидкую фазу его необходимо охладить до температур ниже точки кипения −252,87 °C или 20,28 K (при давлении 1 бар) [224, 324]. Этого можно добиться, используя эффект Джоуля – Томсона. Лежащий в основе этого процесса принцип – адиабатическое расширение газа, ведущее к уменьшению сил притяжения молекул газа [325]. Это эквивалентно увеличению потенциальной энергии газа E_{pot} за счет снижения его кинетической энергии $E_{\text{kin}} \propto T$ [209].

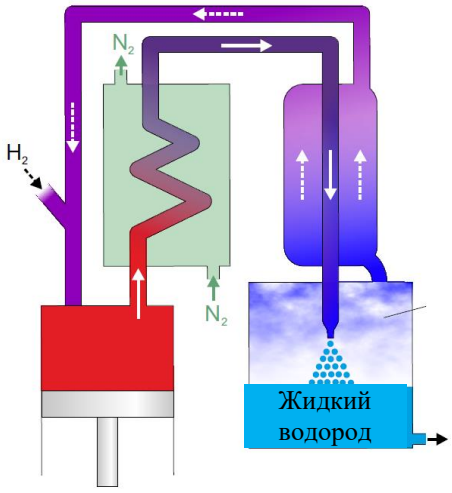


Рисунок 3.3. Сжижение водорода с использованием цикла Линде. Основано на [209, 326]

Таблица 3.5. Исходные параметры для сжижения, криогенного хранения жидкого водорода, испарения при атмосферном воздухе и крионасоса

Сжижитель	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации
	$\beta_{\text{liqu}}^{\text{inv}}(\$/\text{kWh}_{\text{H}_2})$	$\beta_{\text{liqu}}^{\text{inv}}(\%_{\text{inv}})$	$\eta_{\text{liqu}}(\%)$	L_{liqu} (a)
2015	3000		70,4	
2025	2700	4	71,5	16
2035	2400		72,6	
Источники: Стоимость на 2015 г. рассчитана на основе данных о стоимости и экономии от масштабов производства, указанных в [305, 309]. Эффективность существенно зависит от масштабов производства [305, 327, 328], так как более крупные предприятия могут извлекать пользу из интеграции с другими процессами, например разделения воздуха [305], для снижения энергопотребления при сжижении водорода. Ввиду того, что такой синергии в небольших установках, работающих в регионах, добиться невозможно, было принято скромное значение снижения потребности в электроэнергии в размере 5 %. С учетом потребления энергии на уровне 14 кВт/ч/кг-H_2 в 2015 г. получаем 13,3 кВт/ч/кг-H_2 в 2025 г. и 12.6 кВт/ч/кг-H_2 в 2035 г.				

Резервуар	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации
с жидким H_2	$\beta_{lhyd}^{inv}(\$/kg_{H_2})$	$\beta_{lhyd}^{inv}(\%_{inv})$	$\eta_{lhyd}(\%)$	L_{lhyd} (a)
2015	200			
2025	180	2	99	20
2035	160			
Источники: в [309] приводятся расчеты стоимости резервуара для хранения жидкого водорода (180 $/кг в 2007 г.), используемого в автоцистернах, а также резервуаров-хранилищ большого объема (20–40 $/кг в 2007 г). Данные из этого источника были использованы для расчета стоимости *с учетом монтажа* на 2015 г., равной 200 $/кг. Криогенные резервуары – зрелая технология, поэтому изменение стоимости было принято аналогичным таковому для резервуаров хранения газообразного водорода. С учетом потерь на работу механизмов и утечек эффективность хранилищ жидкого водорода была принята равной 99 % [306, 321, 328]				
Испаритель	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации
атмосферного воздуха	$\beta_{vapo}^{inv}(\$/kWh_{H_2})$	$\beta_{vapo}^{inv}(\%_{inv})$	$\eta_{vapo}(\%)$	L_{vapo} (a)
2015				
2025	33	2	н/п	15
2035				
Источники: Конструкция испарителя атмосферного воздуха включает оребренные трубки, изготовленные из алюминия или стали [329–331]. Это довольно простые устройства, используемые десятилетиями. Расчетная стоимость составила 1 $/(кг-$H_2$/ч) (данных из литературных источников получить не удалось)				
Крионасос	inv-cost	Фиксированные расходы	Эффективность	Срок эксплуатации
	$\beta_{cpump}^{inv}(\$/kWh_{H_2})$	$\beta_{cpump}^{inv}(\%_{inv})$	$\eta_{cpump}(\%)$	L_{cpump} (a)
2015	480		91,7	
2025	360	4	92,1	15
2035	240		92,5	
Источники: стоимость без установки 400 $/кВт, [332] + 20%-я надбавка за монтаж. В данном источнике прогнозируется существенное снижение стоимости (более чем на 80 %). Было принято более консервативное значение снижения стоимости на 25 % и 50 % за последующие два десятка лет. Вследствие отсутствие подробных данных (по сжатию до 880 бар) был принят подход расчетов, аналогичный использовавшемуся для определения эффективности сжижителя: расчетное снижение потребления энергии составляет 5 % за десять лет, с 3 кВт/ч/кг-H_2 в 2015 г. до 2,85 кВт/ч/кг-H_2 и 2,7 кВт/ч/кг-H_2 соответственно				

Источники: в случаях, когда данные по стоимости с учетом монтажа были не доступны, доступные данные о стоимости системы умножались на 1,2 для того, чтобы учесть эти дополнительные расходы. Эти оценки можно

считать достаточно консервативными, так как в некоторых других источниках для этой технологии приводятся значения 1,2–1,3 [328] или 1,2–1,5 [308].

Цикл Линде (рис. 3.3) все еще считается одним из наиболее простых способов сжижения водорода [325, 333]. Этот процесс состоит из трех этапов:

1. Сжатие. «Сжав исходный водород до более высокого давления, некоторое охлаждение можно выполнять при более высоких температурах, что снижает работу на охлаждение [...] Ввиду того, что сжатие газа выполняется с большей эффективностью, чем его охлаждение, следует стремиться к сжатию газа до максимально возможного давления» – Уолнум и др. [334].

2. Охлаждение. Сжатый теплый газ подается в теплообменник, где он охлаждается с помощью холодного или жидкого азота [325, 435] до температуры около 80 K [317]. Эта температура намного ниже максимальной температуры инверсии водорода (205 K при давлении 1 бар [305, 325], или ≈ 100 K при 160 бар, так как на последующем этапе требуется некоторый перепад давлений.

3. Расширение. После этого становится возможным выполнить расширение водорода с помощью дросселя Джоуля – Томсона для еще большего снижения его температуры. При прохождении охлажденного водорода через дроссель некоторая его часть переходит в жидкую фазу. Остальной газ возвращается в начало цикла через теплообменник.

В теории сжижение водорода можно достичь с затратами энергии 3,9 кВт/ч/кг [310] (12 % НТС). По сравнению с этим теоретическим значением энергопотребление современных сжижителей[67] в среднем в три раза выше (12,5–15 кВт/ч/кг [333], 10–18 кВт/ч/кг [328], 7–16 кВт/ч/кг [327], 13,4 кВт/ч/кг [310] для небольших установок). Таким образом, примерно третья часть хранящейся энергии затрачивается на сжижение.

После ожижения водород хранится в изолированных криогенных емкостях-хранилищах – это снижает привнесение тепла и выкипание водорода. Однако ввиду того, что полностью исключить утечки не представляется

[67] В [336] изложен обзор современных (на 2012 г.) сжижителей.

возможным, в зависимости от объема и степени изоляции емкости происходит испарение от 0,03 до 2 процентов водорода в сутки [306, 321, 328].

При использовании резервуара с жидким водородом для заправки ТС возможны два варианта: первый – испарение жидкого водорода в испарителе при температуре атмосферного воздуха (или в обогреваемом испарителе) с последующим сжатием, как описано в п. 3.3.1. В этом случае потребление энергии составляет 20 кВт/ч (14 кВт/ч на сжижение, 6 кВт/ч на сжатие), или 60%$_{НТС}$. Второй, более эффективный способ заключается в использовании «криогенного насоса» (крионасоса), который перед испарением сжимает водород в жидкой фазе до 900 бар [337]. При этом низкая температура жидкого водорода делает ненужным предварительное охлаждение.

Вследствие того, что лишь небольшое число таких систем было введено в строй на данный момент, данных о фактическом энергопотреблении очень мало. У Ачевес и др. [332] указана оценка в 2 кВт/ч/кг для сжатия водорода до 880 бар для заправки FCEV. Там же указывается энергопотребление при криогенном сжатии до 350 бар, равное 1,5 кВт/ч/кг.

Заключение

Произведен обзор легкового автомобильного транспорта, как с классическим ДВС, так и двумя перспективными конструкциями, а именно: автомобилей на основе аккумуляторных батарей и транспортных средств на основе топливных элементов.

Отражена информация по состоянию инфраструктуры и прогнозы по ее модернизации. Оценены затраты на зарядные станции для BEV, а также пункты заправки FCEV водородом. Развитие инфраструктуры пропорционально развитию автомобильного транспорта на альтернативной энергетике.

Преобразование энергии возможно не только путем развертывания в регионах мощностей по генерации электричества, но и при электролизе водорода, работе топливных элементов и использовании технологии Power2Gas. Рассмотрена технология электролиза и необходимое оборудование. Посредством имитационного моделирования эффективность системы P2G была оценена в 99 % (с учетом энергии, затрачиваемой на компрессию подаваемого водорода и более низкой транспортной эффективности). В дополнение к процессу P2G сеть подачи газа в регионах была реализована в имитационной модели в виде существующей емкости хранения «сеть подачи газа». Это фактически обеспечивает возможность задействовать систему P2G, то есть подавать водород в сеть газоснабжения в любой момент времени.

Монография содержит информацию по хранению энергии. С помощью имитационного моделирования разработана двухэтапная система хранения водорода. Реализована упрощенная каскадная система с двумя уровнями давления (350 и 880 бар). На основе результатов измерений, общая энергия сжатия всего процесса (с 20 до 880 бар) была рассчитана равной 6 кВт/ч/кг (18 % НТС). В соответствии с кривой изоэнтропического сжатия, 70 процентов энергии сжатия приходится на первый этап (20–350 бар) и 30 процентов – на второй (350–880 бар).

Также водород можно хранить в жидком состоянии, для чего рекомендовано применять Цикл Линде, который заключается в сжатии до максимально возможного давления, последующем охлаждении посредством холодного или жидкого азота до температуры 80 К. Цикл завершается расширением с помощью дросселя Джоуля – Томсона, благодаря чему достигается еще большее снижение его температуры.

Список литературы

1. The Economist: «Месть Никола Тесла», 06 2011. [онлайн] URL: http://www.economist.com/node/18750574
2. Д. А. Ноттер, К, Куравелу, Т. Карачалиос, М. К. Далету, Н. Т. Хаберланд: «Исследование жизненного цикла областей применения полимерных электролитических мембранных топливных элементов: электрические средства обеспечения мобильности, малые и миниатюрные системы комбинированного производства тепла и электроэнергии», Energy Environ. Sci, т. 8, стр. 1969–1985, 2015 г. doi: 10.1039/C5EE01082A. [онлайн]. URL: http://dx.doi.org/10.1039/C5EE01082A
3. А. Регетт, К. Пеллингер, С. Эллер: «Power2Gas - Hype oder SchlCssel zur Energiewende?» Energiewirtschaftliche Tagesfragen, т. 64, № 10, 2014 г. [онлайн]. URL: https://www.ffe.de/download/article/522/Artikel_et_10-2014.pdf
4. Р. Эдвардс, Х. Хасс, Дж.-Ф. Ларив, Д. Рикеард, В. Вейндорф: «Отчет по циклу «от скважины до бака», версия 4.a – анализ «от скважины до колес» перспективных автомобильных видов топлива и силовых установок с европейской перспективы», Комиссия Европейского союза – Объединенный исследовательский центр, технический отчет, 2014. [онлайн]. URL: http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/iet.jrc.ec.europa.eu.about-jec/files/documents/report_2014/wtt_report_v4a.pdf
5. М. Эрикссон, С. Алгрен: «Анализ жизненного цикла бензина и дизельного топлива», Шведский университет агрономии и Шведский центр знаний в области возобновляемых транспортных видов топлива, Упсала, технический отчет. 2013:058, 05 2013, iSSN 1654–9406. [онлайн]. URL: http://pub.epsilon.slu.se/10424/17/ahlgren_s_and_eriksson_m_130529.pdf
6. М. Фелгенхауэр, Т. Хамахер: «Существующие промышленные электролизеры и локальная выработка водорода для транспортных средств в штате Южная Каролина», International Journal of Hydrogen Energy, стр. 2084–2090, 2014. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.12.043
7. М. Ф. Фелгенхауэр, М. А. Пеллоу, С. М. Бенсон, Т. Хмамхер: «Оценка сопутствующих выгод транспортных средств на основе аккумуляторных батарей и топливных элементов в регионе штата Калифорния», International Journal ENERGY, т. 114, стр. 360–368, 2016. doi: 10.1016/j.energy.2016.08.014
8. М. Беер, Т. Гобмейер, Ф. Хауптманн, В. Маух, Р. Подгайски, М. Штек, С. фон Роон: «Ganzheitliche dynamische Bewertung der KWK mit Brennstoffzellentechnologie», Forschungsstelle fuer Energiewirtschaft e.V., технический отчет, 11 2007. [онлайн]. URL: https://www.ffe.de/download/langberichte/DL_eduard_2007_11_21.pdf
9. Дж. Адолф, К. Балцер, А. Дедике, У. Шабла, К. Вибранд, С. Роммерскирхен, Н. Андрес, А. ауф дер Маур, О. Эрентраут, Л. Крамер, С. С. бург: «Shell PKW-Szenarien bis 2040». Shell Deutschland Oil GmbH, технический отчет, 09 2014. [онлайн]. URL: http://s06.static-shell.com/content/dam/shell-new/local/country/deu/downloads/pdf/shell-pkw-szenarien-bis-2040-vollversion.pdf

10. Enercon GmbH: «Средства преобразования ветровой энергии производства компании ENERCON – обзор продукции», 07 2010. [онлайн]. URL: http://www.enercon.de/pZdownloadsZEN_Productoverview_0710.pdf
11. Отдел комплексных анализов и прогнозирования: «Ежегодный энергетический прогноз – 2015 с прогнозами до 2040 г.», Департамент энергетики США, технический отчет, 04 2014. 04 2015. [онлайн]. URL: www.eia.gov/forecasts/aeo
12. Л.-Х. Нгуен, Э. Хатчинсон, А. Гулд, М. Найберг, Дж. Мерилл: «Контроль достижений – обзор возобновляемых источников энергии», Энергетический комитет штата Калифорния, технический отчет, 09.2015. [онлайн]. URL: http://www.energy.ca.gov/renewables/tracking_progress/documents/renewable.pdf
13. М. Гварньери: «Оглядываясь на электрические автомобили», Конференция по вопросам изучения истории электрических технологий, (HISTELCON), 2012, третий съезд IEEE, 2012. doi: 10.1109/HISTELCON.2012.6487583
14. О. Эгбу, С. Лонг: «Барьеры для широкого внедрения электрических транспортных средств: анализ отношения и восприятия потребителей», Energy Policy, т. 48, стр. 717–729, 2012. doi: 10.1016/j.enpol.2012.06.009
15. «Техническое исследование аккумуляторных батарей высоких энергий для легковых электрических транспортных средств», Глобальный проект по климату и энергии, технический отчет, 10.2006. [онлайн]. URL: https://gcep.stanford.edu/pdfs/assessments/ev_battery_assessment.pdf
16. М. Оркатт: «Недорогие электрические автомобили ближе, чем выдумаете», 04.2015. [онлайн]. URL: http://www.technologyreview.com/news/536336/inexpensive-electric-cars-may-arrive-sooner-than-you-think/
17. А. Кампкер, Д. Бендер, Ф. Шмитт: «Das Volks-Elektroauto geht an den Start», Industrieanzeiger, № 10, стр. 36–37, 10.2010. [онлайн]. URL: http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/7a0c12a6e5cd2fd8c12574bb002a1f72/iaz_10_serie_streetscooter_300dpi.pdf
18. Б. Найквист, М. Нилссон: «Быстрое снижение стоимости аккумуляторных батарей для электрических транспортных средств», Nature Climate Change, т. 5, стр. 329–332, 03.2015. doi: 10.1038/nclimate2564
19. General Motors: «Представляем полностью электрический автомобиль 2017 г. в. Chevrolet Bolt EV», 2016, дата доступа: 06.06.2016. [онлайн]. URL: http://www.chevrolet.com/bolt-ev-electric-vehicle.html
20. Tesla Motors, Inc.: «Model 3», 2016, дата доступа: 06.06.2016. [онлайн]. URL: https://www.teslamotors.com/model3
21. Дж. Джян, К. Жан: «Основные сведения о литий-ионных батареях и их применение в транспортных средствах с электрическим приводом». Wiley, 04.2015. [онлайн]. URL: http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1118414780.html
22. К. Лю, З. Г. Нил, Г. Као: «Основные сведения об электрохимических перспективах материалов изготовления катодов для перезаряжаемых аккумуляторных батарей», Materials Today, 2015. doi: 10.1016/j.mattod.2015.10.009. [онлайн]. URL: http://ac.els-cdn.com/S1369702115003181/1-s2.0-S1369702115003181-main.pdf?_tid=f2cf2e76-c4e7-11e5-a9fd-00000aab0f01&acdnat=1453893799_1ad40166826713a2db7c0dc3a74d2368

23. Е. К. Эдвардс: «Пределы лития», Nature, т. 526, 10.2015. doi: 10.1038/526S93a. [онлайн]. URL: http://www.nature.com/natu re/journal/v526/n7575_supp/pdf/526S93a.pdf
24. Д. Денг: «Литий-ионные батареи: основы, текущее состояние, проблемы», Energy Science & Engineering, т. 3, № 5, стр. 385–418, 09 2015. doi: 10.1002/ese3.95
25. Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG: «Проработка концепта Porsche», 2016, дата доступа: 25.01.2016. [онлайн]. URL: http://www.porsche.com/microsite/mission-e/international.aspx
26. Б. Маранцани: «Берта Бенц выезжает на дорогу... 125 лет назад», 08 2013. [онлайн]. URL: http://www.history.com/news/bertha-benz- hits-the- road-125-years-ago
27. Агентство по патентам и товарным знакам Германии (Deutsches Patent und Markenamt): «Der Streit um den "Geburtstag" des modernen Automobils», 12.2014. [онлайн]. URL: http://www.dpma.de/service/klassifikationen/ipc/ipcprojekt/einekurzegeschichtedesautomobils/geburtstagdesautos/index.html
28. Калифорнийское товарищество пользователей топливных элементов: «Карта заправочных станций», дата доступа: 27.01.2016. [онлайн]. URL: http://cafcp.org/stationmap
29. Калифорнийское товарищество пользователей топливных элементов: «H2 Infrastruktur – CEP Tankstellen», дата доступа: 27.01.2016. [онлайн]. URL: https://cleanenergypartnership.de/h2-infrastruktur/cep-tankstellen/
30. H2 Mobility: «Wasserstoff tanken in Deutschland zukuinftig flaechendeckend moglich," 10.2015. [онлайн]. URL: http://h2-mobility.de/wp-content/uploads/2015/10/Wasserstoff-tanken-in-Deutschland-zukQnftig-flaechendeckend-moglich_13.10.2015.pdf
31. Nationale Plattform Elektromobilitat: «Ladeinfrastruktur fur Elektrofahrzeuge in Deutschland - Statusbericht und Hand- lungsempfehlungen 2015», Gemeinsame Geschaftsstelle Elektromobilitat der Bundesregierung Deutschland, технический отчет, 2015. [онлайн]. URL: http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_AG3_Statusbericht_LIS_2015_barr_bf.pdf
32. М. Мелаина, М. Хелвиг: «Оценка инфраструктуры штата Калифорнии для подключения и зарядки электрических транспортных средств», Национальная лаборатория по изучению возобновляемой энергии, технический отчет, 04.2014.
33. «InsideEVs.com»: «В 81 % случаях зарядка электрических транспортных средств выполняется дома», 2014, дата доступа: 09.05.2016. [онлайн]. URL: http://insideevs.com/most-electric-vehicle-owners-charge-at-home-in-other-news-the-sky-is-blue/
34. З. Шахан, «EVObsession.com»: «Средняя дистанция пробега у владельцев Chevy Volt такая же, как у владельцев Nissan Leaf», 11.2015, дата доступа: 09.05.2016. [онлайн]. URL: http://evobsession.com/chevy-volt-drivers-average-nearly-as-many-electric-miles-as-nissan-leaf-drivers/
35. Electric Vehicles Initiative and International Energy Agency, «Мировой прогноз электрических транспортных средств – 2015», Electric Vehicles Initiative and International Energy Agency, технический отчет, 2015 [онлайн]. URL: http://www.iea.org/evi/Global-EV-Outlook-2015-Update_1page.pdf

36. М. Кейн, «InsideEVs.com»: «Седан Toyota Mirai с топливным элементом оценен в 57 500 долл.», 11.2014, дата доступа: 10.04.2016. [онлайн]. URL: http://insideevs.com/toyota-mirai-fuel-cell-sedan-priced-at-57500-specs-videos/
37. У. Каннигэм, «cnet.com»: «Toyota Mirai: автомобиль с дистанцией пробега в 300 миль и нулевыми выбросами», 11.2014, дата доступа: 10.04.2016. [онлайн] URL: http://www.cnet.com/roadshow/auto/2016-toyota-mirai/
38. К. Талати, Дж. Пинкман, Б. Робинсон: «Цены в сделках с новыми автомобилями стабильно растут, в апреле 2015 г. – на 2,6 процента, согласно kelley blue book», 05.2015. [онлайн]. URL: http://mediaroom.kbb.com/2015-05-01-New-Car-Transaction-Prices-Rise-Steadily-Up-2-6-Percent-in-April-2015-According-to-Kelley-Blue-Book
39. «statista.de»: «Entwicklung der durchschnittlichen Neuwagenpreise in den Jahren 1995 bis 2014 in Deutschland», 2015. [онлайн] URL: http://de.statista.com/statistik/daten/studie/36408/umfrage/durchschnittliche-neuwagenpreise-in-deutschland/
40. М. Шаде, «Autobild.de»: «Das kostet der Toyota Mirai», 04, дата доступа: 10.04.2016. [онлайн]. URL: http://www.autobild.de/artikel/toyota-mirai-fcv-vorstellung-und-preis-5178340.html
41. Б. Шмидт, «Frankfurter Allgemeine Zeitung»: «Unterwegs mit dem Wasserstoffauto», 12 2015, дата доступа: 10.04.2016. [онлайн] URL: http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/auto-verkehr/mit-dem-wasserstoffauto-toyota-mirai-durch-deutschland-13977499.html
42. «Автомобили завтрашнего дня – на чем мы будем ездить в 2023 году?» Топливный институт, технический отчет, 11.2013. [онлайн]. URL: www.fuelsinstituteorg/ResearchArticles/TomorrowsVehicles.pdf
43. «Energieprognose 2012–2040 Deutschland», ExxonMobil Central Europe Holding GmbH, технический отчет, 2012. [онлайн]. URL: http://www.exxonmobil.com/Germany-German/PA/Files/Energieprognose_2012.pdf
44. Benz & Co. in Mannheim: «Fahrzeug mit Gasmotorenbetrieb / Транспортные средства, работающие от газа», Патент Германии DE37435, 2.11.1886, dE Patent 37,435. [онлайн]. URL: https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE000000037435A
45. С. Эллгас: «Моделирование водородного двигателя внутреннего сгорания с образованием криогенной смеси», докторская диссертация, Universitat der Bundeswehr Munchen, 2008, ISBN: 978-3-86727-529-3.
46. К. Даттон: «Краткая история автомобиля», New Ideas Magazine, т. 1. 05.2006. [онлайн]. URL: http://jhbmotorshow.co.za/pdf/indusry/History- of-the-car.pdf
47. С. Верхельст, Т. Валлнер: «Двигатели внутреннего сгорания, работающие на водороде», Progress in Energy and Combustion Science, т. 35. № 6, стр. 490–527, 12.2009. doi: 10.1016/j.pecs.2009.08.001
48. Дж. Пинто, М. Т. Оливер-Хойо: «Взаимозависимость между потреблением топлива транспортным средством и выбросами углекислого газа как способ демонстрации законов химии», J. Chem. Educ., т. 85, № 2, стр. 218, фев. 2008. doi: 10.1021/ed085p218. [онлайн]. URL: http://dx.doi.org/10.1021/ed085p218

49. Управление США по энергетической информации: «Какое количество углекислого газа производится при сжигании бензина и дизельного топлива (2015, 04)», Департамент энергетики США. [онлайн]. URL: http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=307&t=11
50. Ассоциация европейских производителей автомобилей: «Различия дизельного топлива и бензина», 09.2013. [онлайн]. URL: http://www.acea.be/news/article/differences-between-diesel-and-petrol
51. Управление США по энергетической информации: «Почти весь американский бензин содержит 10 % этанола», 05.2016. [онлайн]. URL: http//www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=26092
52. «Седан BMW 3-й серии», 2016, дата доступа: 25.01.2016. [онлайн]. URL: http://www.bmw.com/com/en/newvehicles/3series/sedan/2015/showroom/index.html
53. Федеральное министерство окружающей среды, сохранения природы, строительства и ядерной безопасности Германии: «Электрические средства обеспечения мобильности: общая информация», 02 2016. [онлайн]. URL: http://www.bmub.bund.de/en/topics/air-mobility-noise/mobility/electric-mobility/
54. Администрация атмосферных программ: «Опись источников выбросов парниковых газов и их поглотителей: 1990–2014 гг.», Агентство США по охране окружающей среды, технический отчет. EPA 430-R-16-002, 04.2016. [онлайн]. URL: http://www3.epa.gov/climatechange/emissions/usinventoryreport.html
55. Администрация транспорта и качества воздуха: «Интересные факты – выбросы парниковых газов в транспортном секторе в 1990–2012 гг.», Агентство США по охране окружающей среды, технический отчет. EPA-420-F-15-002, 03.2015. [онлайн]. URL: https://www3.epa.gov/otaq/climate/documents/420f15002.pdf
56. Deutsches Institut fur Wirtschaftsforschung: «Verkehr in Zahlen 2014/2015, Bundesministerium fur Verkehr und digitale Infrastruktur», технический отчет, 12 2014, ISBN 978-3-87154-493-4. [онлайн]. URL: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/verkehr-in-zahlen.html
57. «Daten zum Verkehr», Umweltbundesamt, технический отчет, 2012. [онлайн]. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4364.pdf
58. М. Кампа, Э. Кастанас: «Влияние загрязнения воздуха на здоровье человека», Environmental Pollution, т. 151, № 2, стр. 362–367, 01.2008. doi: 10.1016/j.envpol.2007.06.012
59. «Воздействие загрязнения воздуха взвешенными частицами, озоном и диоксидом азота на здоровье человека – отчет Рабочей группы ВОЗ», технический отчет EUR/03/5042688, 2003. [онлайн]. URL: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/107478/1/E79097.pdf
60. Департамент энергетики США. (2015, 09) www.fueleconomy.gov – официальный информационный орган правительства США по вопросам топливной экономии [онлайн]. URL: http://www.fueleconomy.gov/
61. Дж. Кенкел: «Аналитическая химия для технических специалистов», 4-я ред., CRC Press, 08.2013, ISBN 9781439881057, стр. 388. [онлайн]. URL: https://www.crcpress.com/Analytical-Chemistry-for-Technicians-Third-Edition/Kenkel/9781566705196

62. Vilas Pol Energy Research Group, «engineering.purdue.edu»: «исследование – литий-ионные батареи», 2016, дата доступа: 24.09.2016 [Online]. URL: https://engineering.purdue.edu/ViPER/research.html
63. К. Ц. Кам, М. М. Доэфф: «Материалы электродов литиевых аккумуляторных батарей», Sigma Aldrich - Material Matters, т. 7, № 4, стр. 56–63. 2012. [онлайн]. URL: http://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigma-aldrich/docs/Aldrich/Brochure/1/material-matters-v7n4.pdf
64. Р. Лю, «scs.illinous.edu», личная сетевая страницы Р. Лю: исследования систем хранения энергии, 2016, дата доступа: 24.09.2016. [онлайн]. URL: http://www.scs.illinois.edu/murphy/Ran/research/energystorage.html
65. К. Дэниэл: «Материалы и процессы обработки при изготовлении литий-ионных батарей», JOM, т. 60, № 9, стр. 43–48, 2008. doi: 10.1007/s11837-008- 0116-x. [онлайн]. URL: http://dx.doi.org/10.1007/s11837-008-0116-x
66. П. Курцвейл, О. К. Дитлмейер: «Elektrochemische Speicher», Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, ISBN: 978-3-658-109004.
67. Samsung SDI: «Призматические литий-ионные батареи (программа деятельности)», 2016. [онлайн]. URL: http://www.samsungsdi.com/automotive-battery/products/prismatic-lithium-ion-battery-cell.html
68. П. Курцвейл: «Достижения в области развития технологий изготовления аккумуляторных батарей», 2015, глава 7, стр. 127–172, ISBN 978-1-78242-398-0. [онлайн]. URL: http://store.elsevier.com/Advances-in-Battery-Technologies-for-Electric-Vehicles/isbn-9781782423980/
69. К. Ллана: «Технологии изготовления аккумуляторных батарей – будущее электрических автомобилей» 03.2015, дата доступа: 2016-03-29. [онлайн]. URL: http://www.bmwblog.com/2015/03/20/battery-technology-the-future-of-electric-cars/
70. KU Leuven Energy Institute: «Электрические транспортные средства – EI – информационный бюллетень 2014-03», 11.2014. [онлайн]. URL: https://www.mech.kuleuven.be/en/tme/research/energy_environment/Pdf/ei-factsheet-electric-vehicles.pdf
71. И. Бухманн, «Batteryuniversity.com – BU-205»: «Виды литий-ионных аккумуляторных батарей», 03.2016, дата доступа: 29.03.2016. [онлайн]. URL: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
72. В. Рудшиз, «ADAC Blog»: «Interview mit Batterie-Experte Sven Bauer: “Der Tesla-Akku oder der im BMW i3 - das ist ein gewaltiger Unterschied”», 10.2013. [онлайн]. URL: https://adacemobility.wordpress.com/2013/10/21/batterie-experte-sven-bauer-der-tesla-akku-oder-der-im-bmw-i3-das-ist-ein-gewaltiger-unterschied/
73. М. М. Доэфф: «Аккумуляторные батареи для целей экологичного развития», 1-е изд. Springer Science + Business Media, 2013, глава 2, стр. 5–49, ISBN 978-1-4614-5790-9.
74. Д. Андре, С.-Дж. Ким, П. Ламп, С. Ф. Лукс, Ф. Малья, О. Пашос, Б. Стяшна: «Будущие поколения катодных материалов: исследование с точки зрения автопромышленности», Journal of Materials Chemistry A, т. 3, стр. 6709–6732, 01.2015. doi: 10.1039/c5ta00361j

75. Automotive Energy Supply Corporation: «Ячейка, модуль и батарея для применения в ЭТС», дата доступа: 29.03.2016. [онлайн]. URL: http://www.eco- aesc-lb.com/en/product/liion_ev/
76. Nissan Center Europe GmbH: «Nissan Leaf», 10 2015. [онлайн]. URL: https://media.nissan.eu/content/dam/services/DE/brochure/104602.pdf
77. Green Car Congress: «Новый Nissan Leaf 2016 года выпуска оснащается батареей емкостью кВтч 30 для пробега в 107 миль», 09.2015. [онлайн]. URL: http://www.greencarcongress.com/2015/09/20150910-leaf.html
78. Д. Т. Курилко: «Компания BMW планирует создать автономное ЭТС и начать “новую эру мобильности”», 03.2016. [онлайн]. URL: http://www.autonews.com/article/20160320/OEM06/303219959/bmw-plans-an-autonomous-ev-for-next-era-of-mobility
79. «EMvalley.com»: «В ожидании новой литий-ионной аккумуляторной батареи от Samsung, обеспечивающей дистанцию пробега 600 км», 01.2016. [онлайн]. URL: http://www.emvalley.com/news/looking-forward-to-the-samsung-lithium-ion-batteries-enabling-600-km-range/
80. Tesla Motors, Inc.: «Model S», 2016, дата доступа: 29.03.2016. [онлайн]. URL: https://www.teslamotors.com/models/
81. Н. Нитта, Ф. Ву, Дж. Т. Ли, Г. Юшин: «Материалы для литий-ионных батарей: настоящее и будущее», Materials Today, т. 18, № 5, стр. 252–264, 06.2015.
82. К. Лоизос, «Techcrunch.com»: «Илон Маск заявляет, что автомобили Tesla достигнут дальности пробега в 620 миль на одной зарядке «в течение года-двух», а полной автономности – «в течение трех лет», 09.2015. [онлайн]. URL: http://techcrunch.com/2015/09/29/elon-musk-says-tesla-cars-will-reach-620-miles-on-a-single-charge-within-a-year-or-two-have-fully-autonomous-cars-in-three-years/
83. М. Либрайх: «На заметку – новая встреча на высшем уровне по вопросам финансов, организуемая Bloomberg», 04 2015. [онлайн]. URL: http://about.bnef.com/content/uploads/sites/4/2015/04/Final-keynote_ML.pdf
84. Toyota Motor Corporation: «Информация о продукте: Mirai 2016 г. в.», 12.2015. [онлайн]. URL: https://pressroom.toyota.com/releases/2016+toyota+mirai+fuel+cell+product.download
85. У. Эрбеле, Р. фон Хельмоль: «Электрические транспортные средства на топливных элементах и водородная инфраструктура: состояние на 2012 г.», Energy & Environmental Science, т. 5, № 10, стр. 8780–8798, 2012. doi: 10.1039/c2ee22596d
86. Х. Хелмс, М. Пент, У. Ламбрехст, А. Лейбих: «Электрические транспортные средства, подключение для зарядки, энергоэффективность гибридных ТС и выбросы за время службы», 18-й Международный симпозиум по вопросам транспорта и загрязнения воздуха, 05 2010, стр. 113–124. [онлайн]. URL: http://www.ifeu.org/verkehrundumwelt/pdf/Helms%20et%20aL%20(2010)%20Electric%20vehicles%20(TAP%20conference%20paper).pdf

87. В. Вишванатан, М. Кинтер-Мейер, П. Балдуччи, К. Джин: «Оценка национальных мощностей хранения энергии для уравновешивания сетей и арбитража – фаза 2, том 2: характеристика затрат и эффективности», Pacific Northewst National Laboratory, технический отчет, 09.2013. [онлайн]. URL: http://energyenvironment.pnnl.gov/pdf/National_Assessment_Storage_PHASE_II_vol_2_final.pdf
88. Agentur fur Erneuerbare Energien: «Wirkungsgrade verschiedener Stromspeicher (Stand: November 2009)», statista, технический отчет, 2009. [онлайн]. URL: http://de.statista.com/statistik/daten/studie/156269/umfrage/wirkungsgrade-von-ausgewaehlten-stromspeichern/
89. Э. Форвард, К. Глитман, Д. Роберт: «Оценка эффективности зарядки электрических транспортных средств уровня 1 и уровня 2», Vermont Energy Investment Corporation - Transportation Efficiency Group, технический отчет, 03 2013. [онлайн]. URL: https://www.veic.org/docs/Transportation/20130320-EVT-NRA-Final-Report.pdf
90. Л. Рэмрот: «NREL проливает свет на связи между системами климат-контроля, сроком службы аккумуляторных батарей и дальностью пробега электрических транспортных средств», Национальная лаборатория по изучению возобновляемой энергии, технический отчет, 06.2012. [онлайн]. URL: http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/53603.pdf
91. «Влияние вспомогательных систем ЭТС» – Национальная лаборатория в Айдахо, технический отчет, 04.2014. [онлайн]. URL: http://avt.inel.gov/pdf/fsev/auxiliary.pdf
92. Х. Йонушат, М. Волк, В. Хандке: «Untersuchung zur Akzeptanz von Elektromobilitat als Stellglied im Stromnetz», Institut fur Zukunftsstudien und Technologiebewertung / B.A.U.M. Consult GmbH, Технический отчет, 02.2012. [онлайн]. URL: http://www.baumgroup.de/fileadmin/interface/files/JBRDNWQEPH-6122014151223-LWVDTSDSPN.pdf
93. Verband der Automobilindustrie e. V.: «Position – Ladeinfrastruktur-Aufbau in Deutschland», 07 2015. [онлайн]. URL: https://www.vda.de/dam/vda/publications/VDA-Positionspapier-zur-Ladeinfrastruktur/VDA%20Positionspapier%20zur%20Ladeinfrastruktur.pdf
94. Дж. Ангеброд, Б. Холланд: «Поднимая вуаль над стоимостью станций зарядки ЭТС», 04.2014. [онлайн]. URL: http://blog.rmi.org/blog_2014_04_29_pulling_back_the_veil_on_ev_charging_station_costs
95. Н. Куин, П. Брукер, С. Сринивасан: «Инфраструктура станций заправки водородом», UC Florida - Центр исследования солнечной энергии штата Флорида, технический отчет, 03.2014. [онлайн]. URL: HydrogenFuelingStationsInfrastructure
96. Ассоциация предприятий нефтяной промышленности Германии: «Anzahl der Tankstellen in Deutschland von 1950 bis 2016», 01 2016. URL: http://de.statista.com/statistik/daten/studie/2621/umfrage/anzahl-der-tankstellen-in-deutschland-zeitreihe/. [онлайн]. URL: http://www.mwv.de/index.php/daten/statistikenpreise/?loc=14

97. Kraftfahrt-Bundesamt, Федеральное министерство транспорта и цифровой инфраструктуры Германии: «Bestand in den Jahren 1960 bis 2016 nach Fahrzeugklassen», 2016, дата доступа: 09.05.2016. [онлайн]. URL: http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/b_fzkl_zeitreihe.html?nn=652402
98. Энергетический комитет штата Калифорния: «Энергетический альманах: отчет о розничных ценах на топливо и данные по штату Калифорния», 2013. [онлайн]. URL: http://energyalmanac.ca.gov/gasoline/piira_retail_survey.html
99. BMW AG, Daimler AG, Ford, General Motors LLC, Honda R&D, Hyundai Motor Company, Kia Motors Corporation, Nissan, Renault, Toyota Motor Corporation, Volkswagen, ENI Refining and Marketing, Galp Energia, OMV Refining and Marketing GmbH, Shell Downstream Services International B.V., Total Raffinage Marketing, EnBW Baden-Wuerttemberg AG, Vattenfall, Air Liquide, Air Products, The Linde Group, Intelligent Energy Holdings plc, Powertech, Nordex, ELT Elektrolyse Technik, Hydrogenics, Hydrogen Technologies, Proton Energy Systems, European Climate Foundation, European Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, NOW GmbH: «Модельный ряд силовых установок, используемых в Европе: объективный анализ – роль электрических транспортных средств на основе аккумуляторных батарей, заряжаемых гибридных транспортных средств и транспортных средств на основе топливных элементов», технический отчет, 2010. [онлайн]. URL: http://www.europeanclimate.org/documents/Power_trains_for_Europe.pdf
100. К. С. Томас: «Экологичные варианты для транспортных целей в XXI веке и далее», Springer Science + Business Media, 2015. [онлайн]. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-16832-6
101. М. Л. Содерман, Д. Кушнир, Б. Санден: «Приведет ли нехватка металла к снижению использования электрических транспортных средств?», Chalmers Publication Library, 2013, глава 7, стр. 76–89, ISBN 978-91-980973-1-3. [онлайн]. URL: http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/182216/local_182216.pdf
102. Л. Абелл, П. Оппенгеймер: «Влияние мировых запасов лития на электрические транспортные средства», 12.2008. [онлайн]. URL: http://action.pluginamerica.org/o/2711/images/World-Lithium-Resource-Impact-on-Electric-Vehicles-v1 .pdf
103. Н. Бутчер: «Вымыслы и правда об электрических транспортных средствах. Часть 1 – кризис производства аккумуляторных батарей», 07.2012. [онлайн]. URL: http://www.greentechmedia.com/articles/read/Guest-Post-EV-Myths-And-Realities-Part-1-The-Battery-Crisis
104. Дж. Форстер: «Нехватка лития: угрожает ли она производству электрических транспортных средств?», Федеральный технологический институт Швейцарии в Цюрихе, технический отчет, 05 [онлайн]. URL: http://www.files.ethz.ch/cepe/top10/forster.pdf
105. С. Х. Мор, Г. М. Мадд, Д. Гюрко: «Запасы и производство лития: критический анализ и общемировые прогнозы», Minerals, т. 2, стр. 65–84, 2012. doi: 10.3390/min2010065. [онлайн]. URL: http://www.mdpi.com/2075-163X/2/1/65/pdf

106. Дж. Ли, Д. Е. Дауни, Л. Ма, В. Кви, Дж. Р. Дан: «Исследование механизмов разрушения катодного материала lini0.8mn0.1co0.1o2 для литий-ионных батарей», Journal of The Electrochemical Society, т. 162, № 7, стр. A1401–A1408, 2015. doi: 10.1149/2.1011507jes
107. Х. Сандерсон: «Tesla в тупике из-за поставок лития», 12.2015. [онлайн]. URL: http://www.ft.com/intl/cms/s/0/4a924a64-99df-11 e5-987b-d6cdef1 b205c.html
108. Talison Lithium: «Презентация для инвесторов», 06.2012. [онлайн]. URL: http://www.talisonlithium.com/docs/pdf-presentations/talison-lithium-investor-presentation-june-2012.pdf
109. Геологическое обследование Геологической службы США: «Сводные данные по минеральной продукции за 2016 г.», Министерство природных ресурсов США, технический отчет, 01.2016, ISBN 978-1-4113-4011-4.
110. К. Берри: «Кобальт в качестве конкретного примера для изучения неустойчивости мировой экономики», 10.2015, дата доступа: 01.04.2016. [онлайн]. URL: http://www.discoveryinvesting.com/blog/2015/10/2/cobalt-as-a-case-study-in-a-wobbly-global-economy
111. Cobalt Development Institute: «Факты о кобальте – спрос и предложение кобальта», технический отчет, 2015. [онлайн]. URL: http://www.thecdi.com/cdi/images/documents/facts/Cobalt%20Facts%20-%20Supply%20%20Demand%20-%2014.pdf
112. MetalBulletinResearch: «Металлы, используемые для производства аккумуляторных батарей», 04.2014. [онлайн]. URL: http://www.joomag.com/Frontend/WebService/downloadPDF.php?UID=0746681001400092759
113. Э. Эрлс, «mining-technology.com»: «Будущее использования никеля: медленно и постепенно или взрывной рост потребления?» 08.2015. [онлайн]. URL: http://www.mining-technology.com/features/featurethe-future-for-nickel-slow-and-steady-or-battery-boom-4647099/
114. И. Федоринова, А. Лемешко, «Bloomberg.com»: «Норильский никель прогнозирует рост использования никеля для изготовления автомобилей в три раза на фоне увеличения продаж Tesla», дата доступа: 03.04.2016. [онлайн]. URL: http://www.bloomberg.com/news/articles/2015-04-13/norilsk-sees-nickel-use-in-cars-tripling-as-tesla-drives-sales
115. Л. Д. Роупер: «Автомобиль Tesla model s», дата доступа: 31.03.2016. [онлайн]. URL: http://www.roperld.com/science/TeslaModelS.htm
116. Дж. Б. Данн, К. Джеймс, Л. Гейнс, К. Галлахер, К. Даи, Дж. К. Келли: «Потоки материалов и энергии в производстве катодных и анодных материалов для литий-ионных батарей», Аргоннская национальная лаборатория, технический отчет. ANL/ESD-14/10, 09.2015. [онлайн]. URL: http://www.ipd.anl.gov/anlpubs/2015/10/121442.pdf
117. М. Вахтлер, П. Аксманн, М. Вольфарт-Меренс: «Aktuelle Entwicklungstrends fur Batterien und Supercaps», 01.2010. [онлайн]. URL: http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Workshopbaende/ws2010-1/ws2010-1_07_WohlfahrtMehrens.pdf

118. Д. М. Моллер: «Химическая эволюция», Walter de Gruyter GmbH, 2010, глава 2, стр. 52, ISBN 978-3-11-022835-9.
119. Б. А. Уиллс, Т. Напьер-Мунн: «Технология Уилса переработки минералов», 8-я ред., Butterworth-Heinemann, 9.2015, глава 1, ч. 3, ISBN 9780080970530.
120. К. Е. Мортимер, У. Мюллер: «Chemie», 9-я ред., Georg Thieme Verlag, 2007, ISBN 978-3-13-484309-5.
121. О. Грогер, Х. А. Гастайгер, Дж.-П. Суксланд: «Обзор электрических средств обеспечения мобильности: аккумуляторные батареи или топливные элементы?», Journal of The Electrochemical Society, т. 162, № 14, стр. A2605–A2622, 2015. doi: 10.1149/2.0211514jes
122. К. Вадиа, П. Албертс, В. Шриникасан: «Ограниченность ресурсов для целей хранения энергии в аккумуляторных батареях для использования в энергосетях и на транспорте», Journal of Power Sources, т. 196, 2011. doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.08.056
123. К. Гомес: «Scotiabank. Глобальный отчет об автотранспорте – количество автомобилей, реализованных в период с 1990 по 2016 г.», 03.2016, http://www.gbm.scotiabank.com/English/bns_econ/bns_auto.pdf. [онлайн]. URL: http://www.statista.com/statistics/200002/international-car-sales-since-1990/
124. Международное управление по проблемам морского дна: «Полиметаллические конкреции», 2003. [онлайн]. URL: https://www.isa.org.jm/files/documents/EN/Brochures/ENG7.pdf
125. Г. Гиришкумар, Б. МакКолски, А. К. Лунц, С. Суонсон, В. Уилк: «Литиево-воздушные аккумуляторные батареи: перспективы и проблемы», J. Phys. Chem. Lett, т. 1, № 14, стр. 2193–2203, июль 2010. doi: 10.1021/jz1005384. [онлайн]. URL: http://dx.doi.org/10.1021/jz1005384
126. Т. Лоше-тер Хорст: «Batterien als Bestandteil zukunftiger Antriebstechnik - Volkswagen AG», 4. Kompetenztreffen Elektromobilitat, 11 2015. [онлайн]. URL: http://www.elektromobilitaet.nrw.de/fileadmin/Daten/Download_Dokumente/Batterien_als_elementarer_Bestandteil_zukuenftiger_Antriebstechnik-Dr._Loesche-ter_Horst.pdf
127. Р. Белис: «Оценка и прогнозирование развития рынка лития с точки зрения стоимости», 01.2013. [онлайн]. URL: https://roskill.com/wp/wp-content/uploads/2014/11/roskill-at-the-lithium-supply-markets-conference.attachment1 .pdf
128. Fox-Davies Resources Specialist: «Рынок лития», 09 2013. [онлайн]. URL: http://www.globalstrategicmetalsnl.com/_content/documents/405.pdf
129. Д. З. Моррис, «Fortune.com»: «Эра электромобилей предвещает взрывной рост добычи лития, при этом стартапы по добыче этого металла сталкиваются с трудностями – и вот почему», 04.2015, дата доступа: 04.03.2016.
130. Дж. Дин, «greentechmedia.com»: «Почему литий – не самая большая проблема в производстве литий-ионных батарей», 06.2015, дата доступа: 03.04.2016. [онлайн]. URL: http://www.greentechmedia.com/articles/read/Why-Lithium-Isnt-the-Big-Worry-for-Li-ion
131. The Economist: «Все более драгоценный металл», 01.2016. [онлайн]. URL: http://www.economist.com/news/business/21688386-amid-surge-demand-rechargeable-batteries-companies-are-scrambling-supplies

132. Р. Д. Боружерди, К. Волф: «Отчет о капитале – новые тенденции», Goldman Sachs, технический отчет, 12.2015. [онлайн]. URL: http://www.goldmansachs.com/our-thinking/pages/macroeconomic-insights-folder/what-if-i-told-you/report.pdf
133. В. Бернхарт, С. Ридерле, М. Юн: «Топливные элементы – реалистичная альтернатива для достижения нулевых выбросов?», Roland Berger Strategy Consultants, Технический отчет, 01.2014. [онлайн]. URL: https://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_Fuel_cells_20140113.pdf
134. О. Т. Холтон, Дж. В. Стивенсон: «Роль платины в топливных элементах с протонообменной мембраной», Platinum Metals Rev., т. 57, № 4, стр. 259–271, 2013. doi: 10.1595/147106713x671222
135. Р. Уиттсток: «Ограниченность ресурсов для целей распространения транспортных средств на топливных элементах: оценка роли повторного использования для удовлетворения будущего спроса на платину», магистерская диссертация, Carl von Ossietzky Oniversitat Oldenburg, 11.2015. [онлайн]. URL: https://www.uni-oldenburg.de/fileadmin/user_upload/f2/projekte/cascadeuse/PDFs/Masterarbeit_Rikka_Wittstock.pdf
136. Департамент энергетики США: «Краткий обзор бюджетов, расходуемых на технологии производства водорода и топливных элементов в 2014 финансовом году», 2013. [онлайн]. URL: http://www1.eere.energy.gov/office_eere/pdfs/budget/fuelcells_ataglance_2014.pdf
137. Г. М. Мадд: «Основные тенденции в области экономии ресурсов (элементы платиновой группы)», Ore Geology Reviews, т. 46, стр. 106–117, doi: 10.1016/j.oregeorev.2012.02.005
138. М. Л. Зинтек, Дж. Д. Кейси, Х. Л. Паркс, Р. Дж. Миллер: «Элементы платиновой группы в Южной Африке – запасы полезных ископаемых и оценка неразведанных запасов минеральных ресурсов», 1-я ред., под ред. М. Л. Зинтек, Дж. М. Хаммарстром, К. М. Джонсон. Министерство природных ресурсов США, Геологическое обследование на 2014 г., Отчет о научном исследовании 2010-5090-Q. [онлайн]. URL: http://dx.doi.org/10.3133/sir20105090Q.
139. Министерство природных ресурсов США, Геологическое обследование «Сводные данные по минеральной продукции – металлы платиновой группы, 2007–2016 гг.», 2016, дата доступа: 04.04.2014. [онлайн]. URL: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/
140. Д. Р. Уилбурн, Д. И. Блайвас: «Металлы платиновой группы – мировое предложение и потребление», Министерство природных ресурсов США, технический отчет, Геологическое обследование – открытый отчет, 2004-1224, 2005. [онлайн]. URL: http://www.canplats.ca/images/File/2004-1224.pdf
141. Р. Хенсли, С. Инампуди, Х.-В. Каас, Дж. Р. Ньюман: «Будущее американской отрасли снабжения автопромышленности: изменения стоимости компонентов, внедрение и возможности для создания дополнительной стоимости до 2020 г.», McKinsey & Company, технический отчет, 03.2012. [онлайн]. URL: http://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/dotcom/client_service/AutomotiveandAssembly/PDFs/The_future_of_the_North_American_automotive_supplier.pdf

142. У. Хэллок: «Очерк об эволюции метрологии и метрический системы», под ред. Х. Т. Уэйд, The Macmillan Company, 1906, оцифровано Архивом Интернета в 2007 г. при финансовой поддержке Microsoft Corporation. [онлайн]. URL: https://ia801407.us.archive.org/30/items/outlinesofevolut00halluoft/outlinesofevolut00halluoft_bw.pdf
143. Johnson Matthey Precious Metal Management: «Графики движения цен – платина – с 25 марта 2006 г. по 25 марта 2016 г.», 03.2016. [онлайн]. URL: http://www.platinum.matthey.com/prices/price-charts
144. И. В. Г. Ван, Г. Ли, Б. Хуань, Дж. Пан, К. Лю, Дж. Хан, Л. Сяо, Л. Жуань: «Окисление водорода в щелочной среде в присутствии катализатора Pt-Ru: оксофильный или электронный эффект?», Energy Environ. Sci т. 8, стр. 177–181, 2015 г. doi: 10.1039/C4EE02564D. [онлайн]. URL: http://dx.doi.org/10.1039/C4EE02564D
145. К. Чан, К. Чау: «Современные технологии изготовления электрических транспортных средств – электрическая тяга», Oxford University Press, 10.2001, глава 5, стр. 67–150.
146. Д. Дорелл, Л. Парса, И. Болдеа: «Автомобильные электродвигатели, генератора и приводные системы с уменьшенным числом постоянных магнитов или без их использования; инновационные конструкторские решения», IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 61, № 10, стр. 5693–5695, 2014. doi: 10.1109/TIE.2014.2307839
147. Дж.-Р. Риба, К. Лопез-Торрез, Л. Ромерал, А. Гарсия: «Тяговые двигатели для электрических транспортных средств без использования редкоземельных элементов: обзор технологических решений»: Renewable and Sustainable Energy Reviews, т. 57, стр. 367–379, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.121
148. К. Т. Чау, К. К. Чан, К. Лю: «Обзор бесщеточных электродвигателей с постоянным магнитом для электрических и гибридных транспортных средств», IEEE Transactions on industrial electronics, т. 55, № 6, стр. 2246–2257, 06.2008. doi: 10.1109/TIE.2007.918403
149. Toyota Motor Corporation, «Prius c 2016», 12.2015. [онлайн]. URL: http://www.toyotacertified.com/ebrochures/16_priusc.pdf
150. General Motors: «Chevrolet showcases Spark EV electric motor», 10.2011, дата доступа: 29.03.2016. [онлайн]. URL: http://media.gm.com/media/us/en/chevrolet/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2011/Oct/1026_spark_elec_mtr.html
151. Т. Жильс: «Обслуживание автотранспорта: проверка, техническое обслуживание, ремонт – новые автомобильные технологии: электрические ТС на аккумуляторных батареях и топливных элементах, гибридные ТС», 5-я ред., Cengage Learning, 01.2015, глава 82, стр. 1643–1670, ISBN: [978 – 1305110595]
152. Дж. Р. Хендершот: «Выбор электрической тяговой системы для гибридных и электрических транспортных средств», 11.2014, под ред. Эрни Фриман. [онлайн]. URL: http://sites.ieee.org/miami/files/2014/11/Hendershot-FIU-Lecture.pdf
153. Д. Шерман: «Мы создаем ЭТС Chevy Spark с двигателем на постоянном магните», 11.2011, дата доступа: 29.03.2016. [онлайн]. URL: http://blog.caranddriver.com/we-build-the-chevy-spark-ev%E2%80%99s-ac-permanent-magnet-motor/

154. А. М. Брэдшоу, Б. Ройтер, Т. Хамахер: «Потенциальная нехватка редкоземельных элементов для «энергетической трансформации», Green, т. 3, № 2, стр. 93–111, 06.2013. doi: 10.1515/green-2013-0014

155. М. Сагава, С. Фудзимура, Н. Тогава, Х. Ямамото, И. Матсуура: «Новый материал для изготовления постоянных магнитов на основе nd и fe», J. Appl. Phys, т. 55, № 6, стр. 2083–2087, 1984. doi: 10.1063/1.333572

156. Ф. Си, Т. А. Жан, Д. Дрецйзингер, Ф. Дойл: «Критический анализ метода экстракции редкоземельных элементов растворителями из водных растворов», Minerals Engineering, т. 56, стр. 10–28, 2014. doi: 10.1016/j.mineng.2013.10.021

157. С. Хоендераал, Л. Т. Эспиноза, Ф. Маршейдер-Вайдеманн, В. Граусс: «Может ли «зеленым» технологиям угрожать нехватка диспрозия?», Energy, т. 49, стр. 344–355, 2013. doi: 10.1016/j.energy.2012.10.043

158. К. Биннеманс, П. Т. Джоунз, Б. Бленпейн, Т. В. Джервен, И. Янг, А. Уолтон, М. Бухерт: «Вторичное использование редкоземельных элементов: критический анализ», Journal of Cleaner Production, т. 51, стр. 1я22, 2013. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.12.037

159. evannex.com: «Наиболее продаваемые в США полностью электрические автомобили на 2015 г. (на основе данных о реализации (в штуках))», 01 2016, дата доступа: 2016.03.29. [онлайн]. URL: http://www.statista.com/statistics/257966/best-selling-electric-cars-in-the-united-states/

160. Дж. Т. Уидмер, Р. Мартин, М. Кимиабеиги: «Тяговые двигатели для электрических транспортных средств без использования магнитов на редкоземельных металлах», Sustainable Materials and Technologies, т. 3, стр. 7–13, 2015. doi: 10.1016/j.susmat.2015.02.001

161. М. Ройтер: «Photovoltaik-Preismonitor Deutschland», Bundesverband Solarwirtschaft e.V., технический отчет, 2013. [онлайн]. URL: http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/130218_EuPD_Preismonitor_q1_13.pdf

162. Ф. Петер, Л. Крампе, И. Цигенхаген: «Entwicklung von Stromproduktionskosten», prognos AG, технический отчет, 10.2013. [онлайн]. URL: http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/aktuelles/131010_Studie_Belectric_Freiflaechen_Solarkraftwerke_Final.pdf

163. Х. Вирт, «Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland», Fraunhofer ISE, технический отчет, 05.2015. [онлайн]. URL: http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf

164. Дж. Н. Майер, С. Филиппс, Н. С. Хуссейн, Т. Шлег, К. Зенкпил: «Текущая и будущая стоимость фотоэлектрической энергетики. Долгосрочные сценарии развития рынка, цен на устройства и нормированной стоимости электроэнергии фотоэлектрических систем промышленного уровня», Fraunhofer-Institute for Solar Energy Systems, технический отчет, 02.2015. [онлайн]. URL: http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/weitere_publikationen/15_AgoraEnergiewende-ISE_Current_and_Future_Cost_of_PV.pdf

165. Д. Фелдман, Г. Барбоуз, Р. Марголис, Т. Джеймс, С. Уивер, Н. Даргут, Р. Фу, К. Дэвидсон, С. Бут, Р. Уайзер: «Тенденции изменения цен на фотоэлектрические системы: исторические данные, недавние изменения и краткосрочные прогнозы – издание 2014 г.», 09.2014. [онлайн]. URL: http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/62558.pdf

166. Энергетический комитет штата Калифорния, Комиссия по вопросам деятельности коммунальных служб штата Калифорния: «Калифорния поворачивается к Солнцу», 04.2016, дата доступа: 15.04.2016. [онлайн]. URL: https://www.californiasolarstatistics.ca.gov/

167. Bundesministerium fur Wirtschaft und Energie, «Zahlen und Fakten», 2016, дата доступа 17.04.2016. [онлайн]. URL: http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Strommarkt-der-Zukunft/zahlen-fakten.html

168. Д. Фелдман, Г. Барбоуз, Р. Марголис, М. Болингер, Д. Чан, Р. Фу, Дж. Стил, К. Дэвидсон, Р. Уайзер: «Тенденции изменения цен на фотоэлектрические системы: исторические данные, недавние изменения и краткосрочные прогнозы – издание 2014 г.», Национальная лаборатория по изучению возобновляемой энергии и Национальная лаборатория Лоуренса в Беркли, технический отчет NREL/PR -6A20- 64898, 08.2015. [онлайн]. URL: https://emp.lbl.gov/sites/all/files/pv_system_pricing_trends_presentation_0.pdf

169. «Marktanalyse Photovoltaik-Dachanlagen», Bundesministerium fur Wirtschaft und Energie, технический отчет, 02.2015. [онлайн]. URL: https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/M-O/marktanalyse-photovoltaik-dachanlagen,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf

170. IHS: «Китайские поставщики продолжают лидировать на рынке фотоэлектрических модулей в 2014 г.», 04.2015, дата доступа: 2016.04.15. [онлайн]. URL: http://press.ihs.com/press-release/technology/chinese-suppliers-continued-lead-solar-pv-module-market-2014-ihs-says

171. В. Квашниг: «Regenerative Energiesysteme», 9-е изд., Hanser Verlag MCnchen, 2015, ISBN: 978-3-446-44267-2.

172. Фотоэлектрические устройства – часть 3. Принципы измерения характеристик наземных фотоэлектрических устройств, контрольные данные о спектральной плотности падающего излучения», Стандарт Международной электротехнической комиссии IEC 60 904-3, ред. 2.0, 04.2008. [онлайн]. URL: https://www.iec-normen.de/214468/iec-60904-3-2008-04-ed-2-0-zweisprachig.html

173. Б. Мэрион: «Сравнение прогнозных моделей определения производительности фотоэлектрических модулей», XXXIII Конференция специалистов по фотоэлектрическим системам IEEE, IEEE, изд., 05.2008. doi: 10.1109/PVSC.2008.4922586 стр. 1 – 6. [онлайн]. URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4922586

174. «Фотоэлектрические устройства – часть 1. Определение фотоэлектрических вольтамперных характеристик», Стандарт Международной электротехнической комиссии, IEC 60 904-1, ред. 2.0, 09.2006. [онлайн]. URL: https://www.iec-normen.de/213029/iec-60904-1-2006-09-ed-2-0-zweisprachig.html

175. Yingli Green Energy Holding Co. Ltd.: «YGE 60 cell 40mm series», 02. [онлайн]. URL: http://www.yinglisolar.com/assets/uploads/products/downloads/YGE_60_Cell_Series_EN.pdf

176. С. Крон, П.-Е. Мортхорст, С. Авербух: «Экономика ветровой энергетики», Европейская Ассоциация по ветроэнергетике, технический отчет, 03.2009. [онлайн]. URL: http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Economics_of_Wind_Energy.pdf
177. Л. Фрид, С. Шукла, С. Сойер, С. Теске: «Глобальный прогноз по ветровой энергетике на 2014 год», Гринпис, технический отчет, 2014. [онлайн]. URL: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/10/GWEO2014_WEB.pdf
178. К. Рефельдт, А.-К. Валлаш, С. Люерс: «Kostensituation der Windenergie an Land in Deutschland," Deutsche WindGuard GmbH», технический отчет, 11.2013. [онлайн]. URL: https://www.wind-energie.de/sites/default/files/attachments/press-release/2013/kosten-der-windenergie-sinken-weiter/kostensituation-der-windenergie-land-deutschland-zusammenfassung.pdf
179. К. Янссен, С. Фаулстих, Б. Хан, Я. Хирш, М. Нойшафер, С. Пфаффел, Е. Рориг, А. Зак, Л. Шульдт, Э. Старк, М. Зиссе: «Windenergie Report Deutschland 2014», Fraunhofer IWES, технический отчет, 2014. [онлайн]. URL: http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de/opencms/export/sites/windmonitor/img/Windenergie_Report_2014.pdf
180. Д. Фалкенберг, С. Бернотат, К. Лоренц, А. Шиффлер: «Marktanalyse - Windenergie an Land», Leipziger Institut fur Energie, технический отчет, 02.2015. [онлайн]. URL: https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/S-T/studie-windernergie-an-land,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf
181. М. Тейлор, К. Дэниэл, А. Илас, Е. И. Со: «Стоимость генерации возобновляемой энергии в 2041 г.», Международное агентство по возобновляемым источникам энергии, технический отчет, 01.2015. [онлайн]. URL: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf
182. Национальная лаборатория возобновляемых источников энергии: «Установленные мощности генерации ветровой энергии», 02.2016, дата доступа: 17.04.2016. [онлайн]. URL: http://apps2.eere.energy.gov/wind/windexchange/pdfs/wind_maps/installed_capacity_current.pdf
183. «WindPowerMonthly.com»: «Десять крупнейших и наиболее привлекательных производителей», 06.2015. [онлайн]. URL: http://www.windpowermonthly.com/article/1352888/ten-biggest-best-manufacturers
184. «WindPowerMonthly.com»: «Компания Enercon занимает 43 % рынка Германии», 02.2015. [онлайн]. URL: http://www.windpowermonthly.com/article/1334635/enercon-takes-43-german-market
185. К. Кальтшмитт, В. Штрейхер: «Erneuerbare Energien», под ред. А. Визе, Springer Berlin Heidelberg, 11.2013, т. 4, ISBN-13: 978-3540282044.
186. Б. Кушман-Ройзин: «Механика природных жидкостей – глава 12. Граничные условия», 1-я ред. John Wiley & Sons, Inc., 2014. [онлайн]. URL: https://engineering.dartmouth.edu/~d30345d/books/EFM/chap12.pdf

187. Дж. М. Кимбала: «Постоянная идеального газа», 01.2014. [онлайн]. URL: http://www.mne.psu.edu/cimbala/learning/general/gas_constant.pdf
188. В. Грейнер, Л. Нейзе, Х. Стокер: «Thermodynamik und Statistische Mechanik», 2-я ред. Verlag Harri Deutsch, 1993, т. 9, ISBN 3-8171-1262-9.
189. Э. Хау, Х. фон Ренуар: «Ветряные энергетические установки основы, технологии, области применения, экономические аспекты», 3-я ред, Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 9783642271519. [онлайн]. URL: https://books.google.de/books?id=KeNEAAAAQBAJ
190. Канцлерство федеральной земли Бавария: «Energie-Atlas Bayern - Volllaststunden und Ertragsindex in 100m und 130m Hohe». [онлайн]. URL: http://geoportal.bayern.de/energieatlas-karten/
191. Ю. Плумер: «Карты лучших мест для размещения солнечных и ветровых генераторов (они не там, где вы думали)». 07.2013. [онлайн]. URL: https://www.washingtonpost.com/news/wonkblog/wp/2013/07/15/these-maps-show-the-best-places-to-put-solar-and-wind-power-its-not-where-you-think/
192. Национальная лаборатория возобновляемых источников энергии: «Соединенные Штаты Америки – потенциальная сила ветра на высоте оси, равной 140 м», 11.2014. [онлайн]. URL: http://energy.gov/sites/prod/files/styles/media_energy_gov_wysiwyg_fullwidth/public/wind_potential_capacity_140m_0.jpg?itok=JjJ5eNAg
193. Национальная лаборатория возобновляемых источников энергии: «США – карта ветровых ресурсов», 05.2009. [онлайн]. URL: http://www.nrel.gov/gis/pdfs/windsmodel4pub1-1-9base200904enh.pdf
194. Национальная лаборатория возобновляемых источников энергии: «США – среднегодовая скорость ветра на земле и в прибрежной полосе на высоте 100 м», 09 2013 [онлайн]. URL: http://www.nrel.gov/gis/images/100m_wind/awstwspd100onoff3-1.jpg
195. «Heizsysteme Vergleich: Die Kosten», 2015, дата доступа: 26.01.2016. [онлайн]. URL: https://www.thermondo.de/ratgeber/kosten/heizsysteme-vergleich/
196. «Information - Vollkosten Heizsysteme» Ministerium fur Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt, технический отчет, 2013. [онлайн]. URL: http://www.mlu.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/MLU/Master-Bibliothek/Landwi
rtschaft_und_Umwelt/E/erneuerbare_Energien/Flyer_Info_Kosten_Heizsysteme.pdf
197. С. Килбург: «Kostenvergleich verschiedener Heizsysteme im Gebaudebestand», Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V., технический отчет, 05.2015. [онлайн]. URL: http://www.carmen-ev.de/files/festbrennstoffe/Kostvgl_05_2015.pdf
198. П. Вольфарт: «Investitionskosten (Cberschlaglich) fur eine Ol-, Gas-Brennwert- und eine Warmepumpenheizung», 2011, дата доступа: 26.01.2015.
199. Bosch Thermotechnik GmbH: «Die neue Heizung - Kosten und Ersparnis», дата доступа: 16.01.2016. [онлайн]. URL: https://www.effizienzhaus-online.de/heizung-kosten-und-ersparnis
200. «Qualifikation zum/r Energieberater/in TGA- Uberblick Heizkessel», 05.2009. [онлайн]. URL: https://www.delta-q.de/exportZsites/default/de/downloads/4.2_Kessel.pdf

201. «Wirkungsgrad der Heizung». [онлайн]. URL: http://www.energiesparen-im-haushalt.de/energie/storage/sites/wirkungsgrad-heizung.html
202. Н. Дифенбах, Т. Лога, Б. Борн, М. Гросклос, К. Херберт: «Energetische KenngroBen fur Heizungsanlagen im Bestand», Institut Wohnen und Umwelt GmbH, технический отчет, 11.2002. [онлайн]. URL: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/IWU_Anlagenkennwerte_Bestand.pdf
203. (2015, 03) Факторы неконтролируемого выброса углекислого газа, таблица a.3. Управление США по энергетической информации. [онлайн]. URL: http://www.eia.gov/electricity/annual/html/epa_a_03.html
204. Е. Бич, «sfgate.com»: «Сравнение расходов: газовая печь против электрических нагревателей». [онлайн]. URL: http://homeguides.sfgate.com/comparing-cost-gas-furnace-vs-electric-heater-61395.html
205. Л. Ривз, «sfgate-com»: «Сколько стоит заменить домашнюю систему отопления?» [онлайн]. URL: http://homeguides.sfgate.com/much-cost-replace-home-heating-system-66680.html
206. А. Айдемир: «Energietechnologien derZukunft- Warmepumpen» Springer Vieweg, 2015, глава 18, стр. 383–397, стр. 17+.
207. К. Аппельханс, С. Экснер, Р. Браке: «Analyse des deutschen Warmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends», Internationales GeothermieZentrum, Bochum University of Applied Sciences, технический отчет, 02 2014. [онлайн]. URL: http://www.geothermie-zentrum.de/fileadmin/media/geothermiezentrum/GeothermieCampus_Bochum/Forschung_und_Projekte/Analyse_des_deutschen_Waermepumpenmarktes/WP-StudieII_GZB_2014.pdf
208. Австрийский технологический институт: «Technologieleitfaden Warmepumpen», Magistrat der Stadt Wien, технический отчет, 03.2014. [онлайн]. URL: https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energieplanung/pdf/waermepumpenleitfaden.pdf
209. В. Демтродер: «Experimentalphysik 1 - Mechanik& Warme», 4-я ред. Springer, 2005, ISBN 3-540-26034-x.
210. BRIO ENERGY PVT. LTD.: «Тепловые насосы производства Coolheat», дата доступа: 24.09.2016. [онлайн]. URL: http://brioenergy.in/heat-pump/
211. В. Демтродер: «Experimentalphysik2», 6-я ред. Springer Spektrum, 2013, ISBN 978-3-642-29943-8.
212. И. Ян: «Руководство по системам выработки экологически чистых видов энергии», Том 5. Хранение энергии. Wiley, 2015, т. 5, глава 5.2, стр. 2311, ISBN 978-1118-38858-7.
213. К. Кришер, К. Шонлебер: «Физика преобразования энергии». deGruyter Boston, 2015. ISBN 150150763X. [онлайн]. URL: http://www.degruyter.com/view/product/431653
214. «Выбросы углекислого газа при сжигании топлива», Международное энергетическое агентство, технический отчет, 2015. [онлайн]. URL: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsFromFuelCombustionHighlights2015.pdf
215. Управление США по энергетической информации, «eia.gov»: «Какое количество углекислого газа производится при сжигании разных видов топлива?». 06 2015. [онлайн]. URL: https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=73&t=11

216. Н. Кржикалла, С. Ахнер, С. Брюил: «Moglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien». Buro fur Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, технический отчет, 04 2013, ISBN: 978-3-920328-64-5. [онлайн]. URL: http://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Plattform/BEE-Plattform-Systemtransformation_Ausgleichsmoeglichkeiten.pdf
217. К. Хейлек: «Оптимизация установки и распределения генерирующих установок и систем хранения электрической и тепловой энергии в энергетической системе Германии на основе моделирования», докторская диссертация. Мюнхенский технический университет, 2015. [онлайн]. URL: http://mediatum.ub.tum.de/?id=1230817
218. Д. Эллер: «Integration erneuerbarerEnergien mit Power-to-Heatin Deutschland-Grundlagen Power-to-Heat». Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, т. 1, глава 2, стр. 7–16.
219. Дж. Кюнэ: «Подход «энергия в (сетевое) тепло»: Erste Betriebs- und Einsatzerfahrungen», 1. Praxis- und Wissensforum Fernwarme/Fernkalte, 10.2015. [онлайн]. URL: http://www.ait.ac.at/fileadmin/mc/energy/downloads/G2_Kuehne_-_power-to-heat_Erfahrungen_Deutschland.pdf
220. М. Кох: «Moderne Gebaudetechnik - Okostrom im Smart Grid - Eine Frage der Flexibilitat», 2013. [онлайн]. URL: http://www.tga-praxis.de/sites/default/files/fachartikel/2_mgt-obge-2013-036-037-grundlagen-bwp.pdf
221. А. Вернер: «Zukunftige Speicher- und Flexibilitatsoptionen durch Power-to-X», EnergieSpeicherSymposium, 03.2014. [онлайн]. URL: http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/ess_2014/DLR-ESS-2014-Woerner_Zukuenftige_Speicher-_und_Flexibilitaetsoptionen_durch_Power-to-X.pdf
222. С. Рамлоу: «Wie heizt Deutschland?», Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., технический отчет, 12.2014. [онлайн]. URL: https://www.bdew.de/internet.nsf/id/C44E72D1F65D174EC1257DAC00319783/$file/141212%20BDEW%20Studie%20Wie%20heizt%20Deutschland%20Anhang.pdf
223. К. Эйнскоу, Д. Петерсон, Э. Миллер: «Протокол программы определения глубины разряда водородных и топливных элементов 14004», Департамент энергетики США, технический отчет, 07.2014. [онлайн]. URL: http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/14004_h2_production_cost_pem_electrolysis.pdf
224. Б. Дикманн, Э. Розенталд: Energie: Physikalische Grundlagen ihrer Erzeugung, Umwandlung und Nutzung», 3-я ред. Springer Spektrum, 2014.
225. М. Штернер, И. Штадлер: «Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration». Springer Vieweg, 2014, № 1, ISBN 978-3-64237380-0.
226. Э. Зулиас, Е. Варкараки, Н. Лимберополус, К. Н. Христодулу, Г. Н. Карагиоргис: «Обзор электролиза воды», 2006. [онлайн]. URL: http://large.stanford.edu/courses/2012/ph240/jorna1/docs/zoulias.pdf
227. В. Кройтер, Х. Хофманн: «Электролиз: важное устройство преобразования энергии в мире устойчивой энергетики», International Journal for Hydrogen Energy, т. 23, № 8, стр. 661 – 666, 1998. doi: 10.1016/S0360-3199(97)00109-2

228. Дж. О. Дженсен, В. Бандур, Н. Жд. Бйеррум, Райз, С. Х. Йенсен, С. Эббесен, М. Могенсен, Н. Тофой, Л. Иде: «Предварительное исследование электролиза воды», 02.2008. [онлайн]. URL: https://www.energinet.dK/SiteCollectionDocuments/Danske%20dokumenter/Forskning%20-%20PS0-projekter/6287%20-%20Elektrolyse%20ved%20over%20100%20gr.%20C.pdf

229. Д. М. Ф. Сантос, К. А. К. Секвейра, Дж. Л. Фигуэйредо: «Производство водорода с помощью электролиза щелочной воды». Quimica Nova, n. 36, № 8, стр. 1176–1193, 2013. doi: 10.1590/S0100-40422013000800017. [онлайн]. URL: http/www.scielo.br/pdf/qn/v36n8/v36n8a17.pdf

230. Н. Жиллет, П. Миллет: «Производство водорода – электролиз щелочной воды». Wiley VCH, 03 2015, глава 4, стр. 117–166, ISBN: 978-3-527-33342-4.

231. The Freedonia Group: «Исследование водородной мировой отрасли с прогнозами на 2016 и 2021 гг.», The Freedonia Group, технический отчет, 07.2012. [онлайн]. URL: http://www.freedoniagroup.com/brochure/28xx/2895smwe.pdf

232. Persistence Market Research: «Исследование мирового рынка водорода: к 2020 г. сектор электролиза воды ожидает крупнейший рост». Persistence Market Research, технический отчет, 03.2015. [онлайн]. URL: https://biotechspain.com/file_download.cfm?ftid=1&fid=83

233. Д. Фрайле: «Прогноз состояния рынка экологичного водорода". CertifHy, технический отчет, 04.2015. [онлайн]. URL: http://www.certifhy.eu/images/3Certifhy_Market_outlook_presentation-Daniel_Fraile_Final.compressed.pdf

234. Т. Хамахер: «Водород и топливные элементы. Водород как стратегический вторичный энергоноситель». Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016, глава 1, стр. 1–20. [Online]. URL: http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-662-44972-1

235. У. Ф. Вогт, М. Шлупп, Д. Бурнат, А. Зюттел: «Новости из области электролиза щелочной воды», 02.2014. [онлайн]. URL: http://www.elygrid.com/wp-content/uploads/2015/09/HE8-Zhaoquing-China-022014-Empa-Vg-ex.pdf

236. Ф. Генезе: «Energietechnologien derZukunft». Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, глава 13, стр. 245–263.

237. Т. Смолкина: «Электролиз воды: состояние и возможности развития», 04.2013. [онлайн]. URL: http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/2%20Water%20Electrolysis%20Status%20and%20Potential%20for%20Development.pdf

238. Дж. Мергел, М. Кармо, Д. Фриц: «Текущее состояние технологий производства водорода путем электролиза воды». Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013, глава 22, стр. 425–450.

239. Б. Пичак, Дж. Мергел: «Водород и топливные элементы – электролитические процессы». Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016, глава 11, стр. 187–207.

240. Д. Циплакидес: «Основы электролиза с использованием полимерных электролитических мембран», 2012, rESEARCH NCL AC UK SUSHGEN DOCS SUMMERSCHOOL [онлайн]. URL: http://research.ncl.ac.uk/sushgen/docs/summerschool_2012/PEM_water_electrolysis-Fundamentals_Prof._Tsiplakides.pdf

241. Департамент энергетики США.: «Многолетние исследования, разработка и план демонстрации. Глава 3.1 Производство водорода», 2012. [онлайн]. URL: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/mypp/pdfs/production.pdf
242. Дж. Холладей, Дж. Ху, Д. Кинг, И. Ван: «Обзор технологий производства водорода», Catalysis today, том 139, стр. 244–260, 2009. doi: 10.1016/j.cattod.2008.08.039
243. Дж. Х. Рассел, Л. Дж. Наттал, А. П. Фиккетт: «Производство водорода путем электролиза с помощью твердотельного полимерного электролита», Proceedings of the American Chemical Society Division of Fuel Chemistry Meeting, т. 18, № 3, 1973, стр. 24 – 40. [онлайн]. URL: https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/18_3_CHICAGO_08-73_0024.pdf
244. Д. Р. Петресон: «Сводная информация о мерах, предпринимаемых Департаментом энергетики США в области производства водорода путем электролиза воды», 12.2014. [онлайн]. URL: http://www.electrohypem.eu/data/Electrohypem%20workshop_DOE_Piotr-Zelenay.pdf
245. Х. Аммерманн, П. Хофф, М. Атанасиу, Дж. Эйлдор, М. Кауфманн, О. Тислер: «Развитие энергетических систем Европы: стационарные топливные элементы для распределенной генерации энергии», Roland Berger Strategy Consultants / Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, технический отчет, 03.2015. [онлайн]. URL: http://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_Fuel_Cells_Study_20150330.pdf
246. Ф. Барбир «Топливные элементы на основе полимерных электролитических мембран». Elsevier, 11.2012, ISBN 978-0-12-387710-9. [онлайн]. URL: http://store.elsevier.com.eaccess.ub.tum.de/PEM-Fuel-Cells/Frano-Barbir/isbn-9780123877109/
247. О. З. Шараф, М. Ф. Орхан: «Обзор технологии топливных элементов: основы и области применения», Renewable and Sustainable Energy Reviews, т. 32, стр. 810–853, 2014. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.012
248. К. Кунуш, П. Пулестон, М. Майоски: «Управление со скользящим режимом топливных элементов PEM–система топливных элементов на основе полимерных электролитических мембран». Springer-Verlag London, 2012, глава 2, стр. 13–33.
249. Д. Ферольди, М. Басуальдо: «Топливные элементы PEM совместно с системами выработки топливного биоэтанола – описание систем топливных элементов PEM». Springer- Verlag London, 2012, глава 2, стр. 49–72.
250. Л. Каретте, К Фридрих, У. Штиммунг: «Топливные элементы – основы и области применения», Fuel Cells, т. 1, № 1, стр. 5–39, 05.2001. doi: 10.1002/1615-6854(200105)1:1<5::AID-FUCE5>3.0.CO;2-G
251. А. П. Сасмито, Е. Биргерссон, А. С. Муджумдар: «Вычислительное исследование управления потоками тепла, воды и газов в батареях топливных элементов PEM», InTech, 2012, глава 12, стр. 305–332, ISBN 978-953-51-0812-2. [онлайн]. URL: http://www.intechopen.com/books/hydrogen-energy-challenges-and-perspectives/computational-study-of-thermal-water-and-gas-management-in-pem-fuel-cell-stacks

252. Osaka Gas: «К вопросу о топливном элементе на основе полимерного электролита», 2012, дата доступа: 2016.03.28. [онлайн]. URL: http://www.osakagas.co.jp/en/rd/fuelcell/pefc/pefc/formation.html

253. Т. Элмер, М. Уорэлл, С. Ву, С. Б. Риффат: «Технология топливных элементов для бытового применения: обзор текущего состояния», Renewable and Sustainable Energy Reviews, т. 42, стр. 913–931, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2014.10.080

254. У. Урбан, К. Джирод, Х. Лохманн: «Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung 2007–2008», Fraunhofer Insititut fur Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, технический обзор, 2009. [онлайн]. URL: http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-948875.pdf

255. Strategy-Platform Power2Gas: «Eckpunkte einer Roadmap Power to Gas», 06.2012. [онлайн]. URL: http://www.powertogas.info/fileadmin/content/Downloads_PtG_neu/Fachbroschuere_Power_to_Gas_Integ ration.pdf

256. Strategy-Platform Power2Gas: «Zentrale Handlungsfelder und Aufgaben», 2013. [онлайн]. URL: http://www.powertogas.info/fileadmin/content/Downloads_PtG_neu/Fachbroschuere_Power_to_Gas_Integration.pdf

257. П. Ничке-Ковски, В. Везинг, Дж. Рудат: «Опыт введения водорода в естественно сформировавшуюся сеть распределения природного газа», International Gas Reesearch Conference, № 108 /TO 5-1,2014. [онлайн]. URL: http://members.igu.org/old/IGU%20Events/igrc/igrc-2014/papers/to5-1_nitschke-kowsky.pdf/

258. Х. Краузе, М. Верши, С. Франке, А. Гизе, Дж. Бентин, Х. Дорр: «Untersuchung der Auswirkungen von Gasbeschaffenheitsanderungen auf industrielle und gewerbliche Anwendungen», Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., технический отчет, 04.2014. [онлайн]. URL: http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/forschung/innovation/pdf/g1_06_10.pdf

259. Г. Мюллер-Зиринг, М. Хенел, В. Коппел, Х. Млакер, М. Штернер, Т. Хохер: «Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz», Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V, технический отчет, 02.2013. [онлайн]. URL: http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/forschung/innovatio n/pdf/g 1 _07_10.pdf

260. Д. Пинхбек, К. Альтфельд: «Подход «энергия в газ», качество газа и водородный проект GERG», Gas for Energy, т. 2012, № 2, стр. 28–31, 02.2012. [онлайн]. URL: https://www.di-verlag.de/media/content/GFE/issue_2_12/Pinchbeck_72_internet_rgb.pdf7xaf26аров=3b1a609fd1c7587a382100b21ed72b3e

261. М. В. Мелаина, О. Антониа, М. Пенев: «Подача водорода в сеть газопроводов подачи природного газа: обзор ключевых вопросов», Национальная лаборатория возобновляемых источников энергии, технический отчет. NREL/TP-5600-51995, 03 2013. [онлайн]. URL: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/blending_h2_nat_gas_pipeline.pdf

262. В. К. Лоусон, Дж. Г. Беннехе, Н. М. Роум, С. Сполдинг: «Потребности в передаче природного газа», Национальный совет нефтяной промышленности – Подгруппа транспортировки газа, технический отчет, 2011. [онлайн]. URL: http://www.npc.org/Prudent_Development-Topic_Papers/3-4_Transmission_Natural_Gas_Demand_Paper.pdf
263. Й. Хюттенраух, Г. Сюллер-Зиринг: «Zumischung von Wasserstoff zum Erdgas», energie I wasser-praxis, стр. 68–71, 10 2010. [онлайн]. URL: http://www.gat-kongress.de/fileadmin/gat/newsletter/pdf/pdf_2010/03_2010/internet_68-71_Huettenrauch.pdf
264. М. Ленер, Р. Тихлер, Х. Штайнмюлер, М. Коппе: «Power-to-Gas: технология и бизнес-модели», Springer Berlin Heidelberg, 2014, глава 2, стр. 7–17. [онлайн]. URL: http://www.springer.com/978-3-319-03994-7
265. К. Мартел «Warmepumpenspeicher: Preis fur Warmwasser-, Puffer-, Kombispeicher», 2015. [онлайн]. URL: http://www.heizungsfinder.de/waermepumpe/speicher/kosten
266. «unidomo.de»: «Heizungen & Sanitarbedarf - Warmwasserspeicher», 2015, дата доступа: 27.01.2016. [онлайн]. URL: https://www.iec-normen.de/214468/iec-60904-3-2008-04-ed-2-0-zweisprachig.html unidomo.de
267. «heizungsdiscount24.de»: «Speichertechnik», 2015, дата доступа: 4 кв. 2015. [онлайн]. URL: http://www.heizungsdiscount24.de/speichertechnik/
268. Г. Пасаоглу, Д. Фиорелло, А. Мартино, Г. Скарцелла, А. Алеманно, А. Зубарева, К. Тиль: «Особенности вождения и парковки европейских пользователей автомобилей – исследования средств обеспечения мобильности», Европейская комиссия, технический отчет, 2012. [онлайн]. URL: https://setis.ec.europa.eu/system/files/Driving_and_parking_patterns_of_European_car_drivers-a_mobility_survey.pdf
269. Г. Зилберг, М. Манасса, М. Корли, Г. Хейдекер, А. Бин-Нун, Д. Бекер, М. Павелке: «Я, моя машина, моя жизнь... в ультрасвязном мире», KPMG, технический отчет, 2014. [онлайн]. URL: https://www.kpmg.com/US/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/me-my-life-my-car.pdf
270. А. Маронг, М. Роше, Д. У. Зауэр: «Влияние стратегии «транспортные средства в сеть» на старение литиевых аккумуляторных батарей электрических автомобилей», Applied Energy, т. 137, стр. 899–912, 2015. doi: j.apenergy.2014.06.063
271. А. Миллнер: «Моделирование деградации свойств литий-ионных батарей электрических транспортных средств», Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES), 2010 IEEE Conference on, 09 2010. doi: 10.1109/CITRES.2010.5619782 pp. 349–356.
272. С. Б. Петерсон, Дж. Апт, Дж. Уайтакр: «Деградация литий-ионных батарей вследствие реалистичной эксплуатации транспортного средства и участия в системе «vehicle-to-grid», Journal of Power Sources, т. 195, стр. 2385–2392, 2010. doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.10.010

273. К. Пфаб: «Gesteuertes Laden 3.0 - Netzintegration von Elektro-Mobilitat auf dem Weg zu ersten kommerziellen Losungen», 2013. [онлайн]. URL: http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderung-von-vorhaben-im-bereich-der-elektromobilitaet-ab-2012/kopplung-der-elektromobilitaet-an-erneuerbare-energien-und-deren-netzintegration/projektflyer- netzintergration/flyer-gl-3.0.pdf
274. Ф. Штребе: «Gesteuertes Laden 3.0 in Berlin», 03.2015. [онлайн]. URL: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/pressDetail.html?title=gesteuertes-laden-3-0-in-berlin&outputChannelId=7&id=T0209987DE&left_menu_item=node__5237
275. З. Шахан: «Срок службы батарей Tesla Powerwall и блоков питания Tesla на один кВт/ч по сравнению с системами производства Aquion Energy, Eos Energy, Imergy», CleanTechnica, 05.2015. [онлайн]. URL: http://cleantechnica.com/2015/05/09/tesla-powerwall-powerblocks-per-kwh-lifetime-prices-vs-aquion-energy-eos-energy-imergy/
276. Г. Фицжеральд, Дж. Моррис: «Отчет о балансировании емкостей аккумуляторных батарей в системе», Rocky Mountain Institute, технический отчет, 02.2015. [онлайн]. URL: http://www.rmi.org/cms/Download.aspx?id=11517&file=2015-01_RMIBatterBoS+Charrette+Report-20150204-Final.pdf&title=Battery+Balance+of+System+Charrette%3A+Post-charrette+Report
277. Т. Штрук, Дж. Бройхманн: «Batteriespeicherprojekte der WEMAG AG», Stuttgarter EnergieSpeicherSymposium, 2015. [онлайн]. URL: http://www.dlr.de/Portaldata/41/Resources/dokumente/ess_2015/pdfs2015/ESS-Symposium/ESS2015_Sturck_Broichmann_WEMAG-Batteriespeicher-zurTeilnahme-am-Regelenergiemarkt.pdf
278. Д. Растлер, А. Экхил, Д. Гонтлетт, Э. Каттер: «Стоимость систем хранения энергии в 2011 г. (обновление) – сводное резюме», Electric Power Research Institute, технический отчет, 02.2012. [онлайн]. URL: http://www.eosenergystorage.com/documents/EPRI-Energy-Storage-Webcast-to-Suppliers.pdf
279. Lazard: «Анализ выравненной стоимости хранения компании Lazard – версия 1.0», Lazard, технический отчет, 11.2015. [онлайн]. URL: https://www.lazard.com/media/2391/lazards-levelized-cost-of-storage-analysis-10.pdf
280. Р. Смит: «Ценность развертывания литий-ионных батарей и политические вопросы, связанные с этой проблемой», 12.2009. [онлайн]. URL: http://www.hks.harvard.edu/hepg/Papers/2009/HEPG%20Dec%2009/Rod_Smith.pdf
281. Samsung SDI: «Системы хранения энергии – от киловатт-часов к мегаватт-часам – у Samsung есть решение», дата доступа: 12.03.2016. [онлайн]. URL: http://www.samsungsdi.com/ess/index.html
282. Panasonic Corporation: «Panasonic готовится принимать заказы на интегрированные домашние системы хранения генерируемой энергии», 02.2012. [онлайн]. URL: http://news.panasonic.com/global/press/data/en120223-3/en120223-3.html
283. Saft SAS: «Хранение энергии и возобновляемые ее источники», дата доступа: 21.03.2016. [онлайн]. URL: http://www.saftbatteries.com/market-solutions/energy-storage-renewables

284. К. Греневельд, М. Хердличка: «От автомобилей к сетям энерогоснабжения: технология аккумуляторных батарей компании Daimler ускоряет переход к генерации возобновляемой энергии», 05.2015. [онлайн]. URL: http://media.daimler.com/dcmedia/0-921-1706476-1-1817530-1-0-0-0-0-1-12759-614216-0-0-0-0-0-0-0.html?TS=1458562597153

285. С. Моррис: «На выставке потребительской электроники CES в Лас-Вегасе анонсирована услуга домашней зарядки BMW i». 01.2015. [онлайн]. URL: https://www.press.bmwgroup.com/usa/article/detail/T0199224EN_US/bmw-i-home-charging-services-unveiled-at-the-ces-consumer-electronics-show-in-las-vegas-pioneering-integrated-charging-solution-for-electric-vehicles-brings-further-reduction-in-charging-costs-and-integrates-home-solar-generating-systems-with-the-household-electricity-system

286. С. Воррат: «Хранение энергии с помощью аккумуляторных батарей: какие варианты предлагаются, и кем? (обновленная редакция)», 12.2015, дата доступа: 21.03.2016. [онлайн]. URL: http://onestepoffthegrid.com.au/battery-storage-whats-on-offer-and-by-whom/

287. С. Энкхардт: «Speicherforderung: Bereits mehr als 12.000 Photovoltaik-Batteriespeicher installiert», 08.2015, pv magazine. [онлайн]. URL: http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/speicherfrderung--bereits-mehr-als-12000-photovoltaik-batteriespeicher-installiert_100020241 /

288. Х. Чен, Т. Н. Конг, В. Ян, К. Тан, И. Ли, И. Дин: «Прогресс в области развития систем хранения электрической энергии: критический анализ», Progress in Natural Science, т. 19, стр. 291–312, 2008.

289. Г. Фукс, Б. Лунц, М. Лойтхолд, У. Зауэр: «Обзор технологий хранения электроэнергии», RWTH Aachen, технический отчет, 2012. [онлайн]. URL: http://www.sefep.eu/activities/projects-studies/120628_Technology_Overview_Electricity_Storage_SEFEP_ISEA.pdf

290. Г. Олбрайт, Дж. Эди, С. Аль-Халладж: «Сравнение свинцово-кислотных и литий-ионных аккумуляторных батарей для целей стационарного хранения энергии», AllCell Technologies LLC, технический отчет, 03.2012. [онлайн]. URL: http://www.batterypoweronline.com/main/wp-content/uploads/2012/07/Lead-acid-white-paper.pdf

291. Р. К. Алувалиа, Т. К. Хуа, Дж. К. Пен, Р. Кумар: «Системный анализ вариантов хранения водорода – проект St001», Аргоннская национальная лаборатория, Технический отчет, 06.2010. [онлайн]. URL: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review10/st001_ahluwalia_2010_o_web.pdf

292. Департамент энергетики США: «График мощностей хранения». [онлайн]. URL: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/images/storage_graph.gif

293. Управление энергетической эффективности и возобновляемой энергии Департамента энергетики США: «Хранение водорода», дата доступа: 12.03.2016. [онлайн]. URL: http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage

294. М. Р. Гардинер, А. Бурк: «Сравнение технологий хранения водорода с точки зрения энергии, потребной для выработки водорода», Fuel Chemistry Division Preprints, т. 47, № 2, стр. 794–795, 2002. [онлайн]. URL: https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/47_2_Boston_10-02_0218.pdf

295. Дж. Куммер: «PSE in Bildern - Wasserstoff», 2016, дата доступа: 2016-04-12. [онлайн]. URL: http://images-of-elements.com/pse/wasserstoff.php

296. К. Кунце, О. Кирхнер: «Хранение сжатого охлажденного водорода», 09.2012. [онлайн]. URL: http://www.stfc.ac.uk/stfc/cache/file/F45B669C-73BF-495B-B843DCDF50E8B5A5.pdf

297. Библиотека фильмов и фотографий: памятная медаль, посвященная подъему воздушного шара, изобретенного Шарлем и Робером, Париж, 1783 г. [онлайн]. URL: http://www.scienceandsociety.co.uk/results.asp?image=10447673

298. В. А. Гюнтер, Р. Михаэли: «H2IntraDrive - Einsatz einer wasserstoffbetriebenen Flurforderzeugflotte unter Produktionsbedingungen», Lehrstuhl fur Fordertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universitat Munchen; BMW Group; Linde Material Handling, технический отчет, 2015. [онлайн]. URL: http://www.fml.mw.tum.de/fml/images/Publikationen/Forschungsbericht_H2IntraDrive_03BS112B.pdf

299. С. Фостер: «Компания BMW Manufacturing расширяет использование водородных топливных элементов», 03.2013. [онлайн]. URL: https://www.bmwusfactory.com/bmw_articles/bmw-manufacturing-expands-use-of-hydrogen-fuel-cells/

300. Дж. Джепсен: «Технико-экономическая оценка систем хранения водорода на основе гидридов металлов», докторская диссертация, Universitat der Bundeswehr Hamburg, 2013. [онлайн]. URL: http://www.hzg.de/imperia/md/content/hzg/zentrale_einrichtungen/bibliothek/berichte/hzg_reports_2014/hzg_report_2014_2.pdf

301. П. Маугбергер: «Твердый водород – технологический прорыв в области хранения водорода», NESSHY Joint Final Event, 10.2010. [онлайн]. URL: http://www.cosy-net.eu/Downloads/NESSHY-COSY-Final_10-10-05-06_Mauberger.pdf

302. М. Эйпах: «Wasserstoffspeicherung in LOHC als Basis fur industrielle Energiespeicheranwendungen», докторская диссертация, Friedrich-Alexander-Universitat Erlangen-Nurnberg, 2016.

303. Дж. фон Вилд, Т. Вридрих, А. Купер, Б. Тозеланд, Г. Мураро, В. ТеГротенюйс, И. Ван, П. Хамбл, А. Карим: «Жидкие органические носители водорода: многообещающая альтернатива существующим технологиям хранения водорода», Proceedings WHEC2010, 2010, стр. 189–197. [онлайн]. URL: http://juser.fz-juelich.de/record/135562/files/HS2b_2_von-Wild.pdf

304. А. К. Купер: «Разработка и проектирование новых систем-сорбентов на основе углерода для эффективного удерживания водорода», Air Products and Chemicals, Inc., технический отчет, 2012. [онлайн]. URL: http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1039432

305. Дж. Шварц: «Усовершенствованный процесс сжижения водорода – проект PD018», 05.2011. [онлайн]. URL: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review11/pd018_schwartz_2011_p.pdf

306. U.S. DRIVE Partnership: «План работы технической группы по вопросам снабжения водородом», U.S. DRIVE Partnership, технический отчет, 06.2013. [онлайн]. URL: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/hdtt_roadmap_june2013.pdf

307. Т. Хуа, Р. Алувалия, Дж-К. Пен, М. Кроумер, С. Лэшер, К. МакКенни, К. Лоу, Дж. Сина: «Технический анализ систем резервуаров-хранилищ сжатого водорода для автомобильной отрасли», Аргоннская национальная лаборатория, технический отчет, 2010. [онлайн]. URL: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/compressedtank_storage.pdf

308. Г. Паркс, Р. Бойд, Дж. Корниш, Р. Ремик: «Сжатие, хранение и подача водорода на заправочных станциях – технические характеристики и стоимость», Национальная лаборатория возобновляемых источников энергии, 15013 Денвер Уэст Парквей, Голден, CO 80401, технический отчет. NREL/BK-6A10-58564, 05 2014. [онлайн]. URL: http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/58564.pdf

309. К. Янг, Дж. Огден: «Определение минимального по стоимости способа доставки водорода», International Journal of Hydrogen Energy, т. 32, № 2, стр. 268–286, 02.2007. doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.05.009. [онлайн]. URL: http://www.its.ucdavis.edu/wp-content/themes/ucdavis/pubs/download_pdf.php?id=1130

310. М. Гардинер: «Энергозатраты на сжатие и сжижение газообразного водорода по сравнению с потребностями в емкостях хранения автомобилей», Департамент энергетики США, технический отчет, 10.2009. [онлайн]. URL: http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf

311. Э. Д. Ротюзен: «Станции заправки водородом – термодинамический анализ процесса заправки водородных транспортных средств для личный поездок», докторская диссертация, Технический университет Дании, 2013. [онлайн]. URL: http://www.dcamm.dk/~/media/Sites/DCAMM/S-Reports/S161%20Erasmus%20D,-d-,%20Rothulzen.ashx?la=da

312. К. Випке, С. Шприк, Дж. Курц, Т. Рамсден, К. Эйнзку, Г. Заур: «Общенациональная образовательная демонстрация электрических транспортных средств на основе топливных элементов – итоговый отчет», Национальная лаборатория возобновляемых источников энергии, технический отчет. NREL/TP-5600-54860, 2012. [онлайн]. URL: http://www.nrel.gov/hydrogen/pdfs/54860.pdf

313. М. Фарцане-Горд, М. Дейми-Даштебайаз, Х. Р. Рабари, Х. Найзманд: «Влияние видов хранилищ и условий хранения на технические характеристики станций заправки сжатым водородом», International Journal of Hydrogen Energy, т. 37, стр. 3500–3509, 2012. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.11.017

314. М. Клелл, Х. Киндреманн, К. Йогл: «Термодинамика хранения газообразного и жидкого водорода», Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC 2007. [онлайн]. URL: http://www.hycenta.tugraz.at/Image/Thermodynamics%20of%20gaseous%20and%20liquid%20hydrogen%20storage.pdf

315. Г. П. Хансен, М. С. И. Ян: «Резервуары высокого давления для водородных транспортных средств с точки зрения конечных изготовителей», 09.2010. [онлайн]. URL: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/ihfpv_hansen.pdf

316. У. Боссел, Б. Элиассон: «Энергия и водородная экономика», 2003. [онлайн]. URL: http://www.afdc.energy.gov/pdfs/hyd_economy_bossel_eliasson.pdf

317. М. Клелл: Хранение водорода в чистом виде из «Руководства по хранению водорода», под. ред. М. Хиршер. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. [онлайн]. URL: http://www.wiley-vch.de/books/sample/3527322736_c01.pdf
318. The Linde Group: «Стандартная водородная заправочная станция Linde, оборудованная компрессором модели IC90», 07.2014. [онлайн]. URL: https://youtu.be/usaQrCDORFY
319. Дж. Шнейдер, С. Матисон: «Вебинар ДЭ США – протокол заправки водородом легковых транспортных средств на основе топливных элементов», 2014. [онлайн]. URL: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f10/webinarslides_h2_refueling_protocols_022213.pdf
320. А. Элгоуэйни, К. Редди: «Анализ предварительного охлаждения для станций заправки водородом – проект pd 107», Аргоннская национальная лаборатория, технический отчет, 06.2015. [онлайн]. URL: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review15/pd107_elgowainy_2015_o.pdf
321. Д. Столтен, Б. Эмонтс: «Научные и технические аспекты использования водорода: материалы, процессы, системы, технологии», Wiley VCH, 02.2016, ISBN: 978-3-527-33238-0.
322. К. Линде, «Gasverfussigungs-maschine», CH Patent LindePatent1895, 06, 1895. [онлайн]. URL: https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&firstdoc=1&docid=CH000000010704A
323. К. Д. Тиммерхаус, Р. Рид: «Криогенная техника – пятьдесят лет развития», 1-я ред. Springer-Verlag New York, 2007, ISBN 978-0-387-46896-9.
324. Ф. Д. Россини: «Отчет о международной шкале температур 1968 г. для практических целей», Международный союз по чистой и прикладной химии (IUPAC), технический отчет, 1970. [онлайн]. URL: http://media.iupac.org/publications/pac/1970/pdf/2203x0555.pdf
325. Дж. З. Жан, Дж. Ли, И. Ли, И. Жао: «Производство, хранение и использование водорода». Wiley, 06 2014, ISBN: 978-1-118-14063-5.
326. Р. Шарма: «Сверхпроводимость». Springer International Publishing, 2015.
327. У. Фици: «Малоразмерные сжижители водорода – ведение». [онлайн]. URL: http://www.linde-kryotechnik.ch/public/fachberichte/cr06-171%20introduction%20to%20small%20size%20hydrogen%20liquefier.pdf
328. Nexant, Inc., Air Liquide, Аргоннская национальная лаборатория, Chevron Technology Venture, Институт технологии газа, Национальная лаборатория возобновляемых источников энергии, Тихоокеанская северозападная национальная лаборатория, TIAX LLC: «Аналитические модели оценки инфраструктуры снабжения водородом системы H2A, результат анализа стандартных маршрутов снабжения – промежуточный отчет», 05.2008. [онлайн]. URL: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/nexant_h2a.pdf
329. Дж. Л. Уолкер, Дж. С. Уолтрип, А. Зэнкер: «Энциклопедия химической переработки и проектирования химических систем: Том 28, под ред. Дж. Дж. МакКетта, У. А. Каннингэм, Marcel Dekker, Inc., 03 1988, ISBN 9780824724788, стр. 176.

330. Chart Industries, Inc.: «Испарители атмосферного воздуха», 2001. [онлайн]. URL: http://www.4cryo.com/pdf_files/vaporizer-at.pdf
331. Linde AG: «Испарители с воздушным обогревом», 2012. [онлайн]. URL: http://www.lindeus-engineering.com/internet.le.le.usa/en/images/P_3_4_e_12_150dpi136_5776.pdf
332. С. М. Асевез, Г. Берри, Ф. Эспиноза-Лоца, Г. Петитпа, В. Свитцер: «Программа развития технологий водорода и топливных элементов Департамента энергетики США – предварительные испытания насоса для жидкого водорода LLNL/Linde 875 бар», Департамент энергетики США, технический отчет, 10.2014. [онлайн]. URL: http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress14/iii_8_aceves_2014.pdf
333. Г. Ихас: «Лекции PHY 4550 и 6555C – криогенная техника – весна 2011 г. – Университет Флориды», 2011. [онлайн]. URL: http://www.phys.ufl.edu/courses/phy4550-6555c/spring11 /liquefaction-2011 .pdf
334. Х. Т. Уолнам, Д. Берстад, М. Дрешер, П. Некса, Х. Квак, К. Хаберстро, Дж. Эсслер: «Принципы ожижения водорода с упором на процессы предварительного охлаждения», XII Конференция по криогенной технике Международного института холода, Дрезден, 09.2012. [онлайн]. URL: http://www.idealhy.eu/uploads/documents/IDEALHY_Cryogenics_2012_Precooling.pdf
335. А. Зюттел: «Материалы для хранения водорода», materialstoday, т. 6, стр. 24–33, 09.2003. doi: 10.1016/S1369-7021 (03)00922-2
336. Дж. Эсслер, К. Хаберстро, Х. Квак, Х. Т. Уолнам, Д. Берстад, П. Некса, Дж. Штанг, М. Борш, Ф. Холденер, Л. Деккер, П. Трайте: «Отчет об исследовании технологий и препятствий для энерго- и экономически эффективного крупномасштабного сжижения водорода», Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), технический отчет, 2012. [онлайн]. URL: http://www.idealhy.eu/uploads/documents/IDEALHY_D1-1_Report_Tech_Overview_and_Barriers_web2.pdf
337. Linde AG, «Движущая сила. Управление водородными проектами при содействии компании Linde». 05.2015. [онлайн]. URL: http://www.the-linde-group.com/internet.global.thelindegroup.global/en/images/00299_LG_Wasserstoff_Broschuere_218x305_EN14_233488.pdf
338. Бюро технической оценки проектов: «Бензоспиртовые топливные смеси – служебная записка по техническим вопросам», Конгресс США, технический отчет, 09.1979. [онлайн]. URL: https://www.princeton.edu/~ota/disk3/1979/7908/7908.PDF